

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Saša Boršić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer, dipl. ing.

Student:

Saša Boršić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno primjenjujući stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Mladenu Šerceru, dipl. ing. na ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva za ovaj rad.

Dr. sc. Ani Pilipović, dipl. ing. posebno zahvaljujem za vođenje kroz rad, iznimno veliki angažman kao i za korisne savjete i rasprave unatoč prenatrpanom rasporedu obaveza.

Također se zahvaljujem i ostalim djelatnicima Katedre za preradbu polimera i drva na pomoći i stručnim savjetima.

Veliko hvala i mojoj obitelji na podršci tijekom studija.

Saša Boršić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Saša BORŠIĆ

Mat. br.: 0035179329

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Utjecaj debljine prevlake na mehanička svojstva polimerne tvorevine

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Influence of coating thickness on the mechanical properties of polymer product

Opis zadatka:

Aditivni postupci su postupci izrade modela, prototipova, dijelova kalupa i alata i gotovih tvorevina komplicirane geometrije u kratkom vremenu. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi proizvode tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Postupak PolyJet Matrix ima prednost prema drugim aditivnim postupcima zbog izrade tvorevina u jednom prolazu s različitim mehaničkim svojstvima miješanjem dvije vrste polimernih materijala. Osim toga, moguće je izrađivati i čvrste jezgre presvučene s elastičnim prevlakama i obratno, a da dimenzije ostanu u zadanim tolerancijama.

U radu je potrebno načiniti pregled materijala i primjene aditivnih postupaka, pogotovo postupka PolyJet Matrix. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi ispitna tijela s različitim debljinama jezgre i vanjske prevlake s različitim kombinacijama čvrstog i elastičnog polimernog materijala, te ispitati mehanička svojstva.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| POPIS SLIKA | I |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| POPIS KRATICA | VI |
| SAŽETAK | VIII |
| KLJUČNE RIJEČI | VIII |
| SUMMARY | IX |
| KEY WORDS | IX |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 ADITIVNI POSTUPCI | 2 |
| 2.1 Povijest aditivnih postupaka | 2 |
| 2.2 Podjela i primjena aditivnih postupaka | 3 |
| 2.3 Trendovi u aditivnoj proizvodnji | 9 |
| 2.4 Razlika između aditivne i CNC proizvodnje | 10 |
| 2.4.1 Materijal | 11 |
| 2.4.2 Brzina | 11 |
| 2.4.3 Složenost | 12 |
| 2.4.4 Točnost | 12 |
| 2.4.5 Geometrija | 13 |
| 2.4.6 Programiranje | 14 |
| 2.5 Faze AM postupaka | 14 |
| 2.5.1 CAD model | 15 |
| 2.5.2 Prebacivanje u STL datoteku | 15 |
| 2.5.3 Prebacivanje datoteke na AM stroj | 16 |
| 2.5.4 Podešavanje parametara AM stroja | 16 |
| 2.5.5 Izrada tvorevine | 16 |
| 2.5.6 Vađenje i čišćenje tvorevine | 16 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.5.7 | Naknadna obrada | 17 |
| 2.5.8 | Primjena..... | 17 |
| 2.6 | Postupci aditivne proizvodnje..... | 17 |
| 3 | PolyJet postupak..... | 26 |
| 3.1 | PolyJet Matrix..... | 27 |
| 4 | EKSPERIMENTALNI DIO..... | 35 |
| 4.1 | Plan pokusa | 37 |
| 4.2 | Materijali za izradu ispitnih tijela | 39 |
| 4.3 | Uređaj za izradu ispitnih tijela PolyJet Matrix postupkom..... | 40 |
| 4.4 | Uređaj za određivanje rasteznih svojstava..... | 42 |
| 4.4.1 | Ispitivanje rastezne čvrstoće..... | 43 |
| 4.4.2 | Oblik ispitnog tijela | 44 |
| 4.5 | Određivanje tvrdoće s pomoću tvrdomjera..... | 45 |
| 4.6 | Provjera dimenzijske točnosti ispitnih tijela | 46 |
| 4.7 | Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava..... | 47 |
| 4.7.1 | Rezultati ispitivanja granice razvlačenja | 49 |
| 4.7.2 | Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće..... | 51 |
| 4.7.3 | Rezultati ispitivanja prekidnog istezanja..... | 53 |
| 4.7.4 | Rezultati ispitivanja modula elastičnosti | 55 |
| 4.7.5 | Rezultati ispitivanja tvrdoće | 57 |
| 5 | RASPRAVA REZULTATA..... | 60 |
| 6 | ZAKLJUČAK | 61 |
| 7 | LITERATURA..... | 62 |
| 8 | PRILOZI..... | 64 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2.1. Čelični kalup za razvlačno puhanje načinjen postupkom izravnog srašćivanja metala s pomoću lasera (e. <i>Direct metal laser sintering - DMLS</i>) | 5 |
| Slika 2.2. Shema postupka preciznog lijevanja za čije je potrebe kalup napravljen pomoću voštanog pramodela načinjenog aditivnim postupkom | 5 |
| Slika 2.3. Primjeri kalupnih umetaka izrađenih različitim RT postupcima | 6 |
| Slika 2.4. Područja primjene AM postupaka u 2013. godini | 8 |
| Slika 2.5. Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2013. godini..... | 9 |
| Slika 2.6. Opravdanost primjene aditivnih postupaka | 11 |
| Slika 2.7. Nakit komplicirane geometrije proizveden postupkom očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom | 12 |
| Slika 2.8. Neke od značajki koje predstavljaju problem pri CNC obradi | 13 |
| Slika 2.9. Faze AM postupaka | 15 |
| Slika 2.10. Shema FDM postupka | 19 |
| Slika 2.11. Shema LOM postupka..... | 20 |
| Slika 2.12. Shema SLA postupka | 21 |
| Slika 2.13. Shema DLP postupka | 21 |
| Slika 2.14. Shema SLS postupka | 23 |
| Slika 2.15. Shema 3DP postupka | 24 |
| Slika 2.16. Prikaz modela rastavljenog na slojeve | 24 |
| Slika 2.17. Usporedba debljina slojeva nekih AM postupaka | 25 |
| Slika 2.18. Primjeri proizvoda načinjenih AM postupcima | 25 |
| Slika 3.1. PolyJet postupak | 26 |
| Slika 3.2. Nanošenje materijala PolyJet postupkom | 27 |
| Slika 3.3. PolyJet Matrix postupak | 28 |
| Slika 3.4. <i>Digitalni materijal</i> | 28 |
| Slika 3.5. Raspon digitalnih materijala dobivenih kombinacijom čvrstog <i>VeroWhitePlus</i> i elastičnog <i>TangoBlackPlus</i> materijala | 29 |
| Slika 3.6. Proizvod od materijala <i>FullCure 720</i> | 29 |
| Slika 3.7. Proizvodi od materijala: a) <i>VeroWhite</i> , b) <i>VeroBlue</i> , c) <i>VeroGray</i> , d) <i>VeroBlack</i> .. | 30 |
| Slika 3.8. Kalupni umetci od materijala <i>PolyJet GreenFire</i> | 30 |
| Slika 3.9. Proizvod od <i>DurusWhite</i> materijala | 31 |
| Slika 3.10. Proizvodi od materijala: a) <i>TangoBlackPlus</i> , b) <i>TangoGray</i> , c) <i>TangoBlack</i> | 31 |
| Slika 3.11. Slušna pomagala od materijala <i>FullCure 650</i> (lijevo) i <i>FullCure 630</i> (desno) | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.12. Proizvod od materijala <i>VeroGlaze</i> | 32 |
| Slika 3.13. Paleta boja dobivene kombinacijom materijala <i>VeroCyan</i> , <i>VeroMagenta</i> , <i>VeroYellow</i> te fleksibilnog <i>TangoBlackPlus</i> materijala | 32 |
| Slika 3.14. Držači britvica načinjeni različitim kombinacijama materijala | 33 |
| Slika 3.15. Isprobavanje krutosti držača britvica | 33 |
| Slika 3.16. <i>Objet350 Connex</i> uređaj za postupak <i>PolyJet Matrix</i> | 34 |
| Slika 4.1. Izrada ispitnih tijela | 35 |
| Slika 4.2. Ispiranje (odvajanje) potpornog materijala | 36 |
| Slika 4.3. Mjerenje dimenzija ispitnog tijela..... | 36 |
| Slika 4.4. Mjerenje tvrdoće ispitnog tijela..... | 36 |
| Slika 4.5. Opći model plana pokusa | 37 |
| Slika 4.6. <i>Objet Connex 350</i> u Centru za aditivne tehnologije..... | 41 |
| Slika 4.7. Ispitna tijela raspoređena po radnoj površini u programu <i>Objet Studio</i> | 41 |
| Slika 4.8. Kidalica <i>Shimadzu AGS – 10kNX</i> | 42 |
| Slika 4.9. Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava | 42 |
| Slika 4.10. Tipične krivulje rasteznog naprezanja – istezanja | 43 |
| Slika 4.11. Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja | 44 |
| Slika 4.12. Mjerenje tvrdoće ispitnog tijela..... | 45 |
| Slika 4.13. Dijagram rasteznog naprezanja - istezanja za provedeni eksperiment..... | 49 |
| Slika 4.14. Ovisnost granice razvlačenja o debljini i tvrdoći prevlake | 51 |
| Slika 4.15. Ovisnost prekidne čvrstoće o debljini i tvrdoći prevlake | 53 |
| Slika 4.16. Ovisnost prekidnog istezanja o debljini i tvrdoći prevlake | 55 |
| Slika 4.17. Ovisnost modula elastičnosti o debljini i tvrdoći prevlake | 57 |
| Slika 4.18. Ovisnost izmjerene tvrdoće o debljini i tvrdoći prevlake | 59 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 2.1. Podjela AM postupaka prema korištenom materijalu | 18 |
| Tablica 4.1. Parametri izrade ispitnih tijela | 39 |
| Tablica 4.2. Mehanička svojstva materijala <i>VeroWhite</i> | 40 |
| Tablica 4.3. Mehanička svojstva materijala <i>TangoBlackPlus</i> | 40 |
| Tablica 4.4. Dimenzije rasteznih ispitnih tijela | 45 |
| Tablica 4.5. Dimenzije ispitnih tijela..... | 46 |
| Tablica 4.6. Rezultati mjerenja sa stvarnim vrijednostima faktora A i B | 48 |
| Tablica 4.7. Rezultati analize varijance – granica razvlačenja..... | 50 |
| Tablica 4.8. Pregled statističkih podataka o modelu za granicu razvlačenja | 50 |
| Tablica 4.9. Rezultati analize varijance – prekidna čvrstoća | 52 |
| Tablica 4.10. Pregled statističkih podataka o modelu za prekidnu čvrstoću..... | 52 |
| Tablica 4.11. Rezultati analize varijance – prekidno istezanje..... | 54 |
| Tablica 4.12. Pregled statističkih podataka o modelu za prekidno istezanje | 54 |
| Tablica 4.13. Rezultati analize varijance – modul elastičnosti..... | 56 |
| Tablica 4.14. Pregled statističkih podataka o modelu za modul elastičnosti | 56 |
| Tablica 4.15. Rezultati analize varijance – tvrdoća..... | 58 |
| Tablica 4.16. Pregled statističkih podataka o modelu za tvrdoću | 58 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Značenje |
|--------|--------------------|--|
| A | [mm ²] | površina početnog poprečnog presjeka |
| b_1 | [mm] | širina uskog dijela ispitnog tijela |
| b_2 | [mm] | širina pri kraju ispitnog tijela |
| E | [MPa] | modul elastičnosti |
| F | [N] | sila |
| F | | varijabla za određivanje statističkih parametara |
| H_0 | | nulta hipoteza |
| h | [mm] | debljina |
| L | [mm] | početna udaljenost između čeljusti uređaja |
| L_0 | [mm] | mjerna duljina |
| l_1 | [mm] | duljina uskog paralelnog dijela ispitnog tijela |
| l_2 | [mm] | udaljenost između proširenog paralelnog dijela ispitnog tijela |
| l_3 | [mm] | ukupna duljina ispitnog tijela |
| P | [W] | snaga |
| R | [MPa] | rastežno naprezanje |
| R_a | [μm] | srednje aritmetičko odstupanje profila – mjera hrapavosti površine |
| R_m | [MPa] | rastezna čvrstoća |
| R_p | [MPa] | prekidna čvrstoća |
| R_r | [MPa] | granica razvlačenja |
| R_x | [MPa] | konvencionalna granica razvlačenja |
| r^2 | [mm] | koeficijent determiniranosti |
| S | | procijenjeno standardno odstupanje |
| SKO | | suma kvadrata odstupanja |

| | | |
|---------------------------------|----------|--|
| t | [min] | vrijeme |
| v | [mm/min] | brzina ispitivanja |
| \bar{x} | | aritmetička sredina |
| α | | osna udaljenost (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa) |
| ε | [%] | istezanje |
| ε_k | [%] | konačno istezanje, istegnuće |
| $\varepsilon_u = \varepsilon_p$ | [%] | prekidno (ukupno) istezanje |

POPIS KRATICA

| | |
|-----------|---|
| 3D | trodimenzionalno |
| 3DP | trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D printing</i>) |
| ABS | akrilonitril/butadien/stiren |
| AM | aditivna proizvodnja (e. <i>additive manufacturing</i>) |
| AMF | datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (e. <i>additive manufacturing file</i>) |
| AP | aditivna proizvodnja |
| CAD | konstruiranje s pomoću računala (e. <i>computer aided design</i>) |
| CAM | računalom potpomognuta proizvodnja (e. <i>computer aided manufacturing</i>) |
| CMB | izgradnja kontroliranjem metala (e. <i>controlled metal buildup</i>) |
| CNC | računalno numeričko upravljanje (e. <i>computer numerical control</i>) |
| DLP | očvršćivanje pomoću digitalno obrađenog svjetlosnog signala (e. <i>digital light processing</i>) |
| DM | digitalni materijal (e. <i>digital material</i>) |
| DMD | digitalna mikroogledala (e. <i>digital micromirror devices</i>) |
| DMLS | postupak izravnog srašćivanja metala s pomoću lasera (e. <i>direct metal laser sintering</i>) |
| DPI | broj točaka po inču (e. <i>dots per inch</i>) |
| DSPC | postupak izravne izrade kalupne ljuske (e. <i>direct shell production casting</i>) |
| EBM | srašćivanje praha upotrebom fokusirane zrake elektrona (e. <i>electron beam melting</i>) |
| EP | epoksidna smola |
| FDM | postupak taložnog očvršćivanja (e. <i>fused deposition modeling</i>) |
| IMLS | postupak posrednog srašćivanja metala s pomoću lasera (e. <i>indirect metal laser sintering</i>) |
| LENS | postupak izravnog taloženja metala laserom (e. <i>laser engineered net shaping</i>) |
| LOM | laminiranje (e. <i>laminated object manufacturing</i>) |
| MDF | vlaknasta ploča srednje gustoće (e. <i>medium – density fiberboard</i>) |
| MIT | e. <i>Massachusetts Institute of Technology</i> |
| PA | poliamid |
| PC | polikarbonat |
| PE-HD | polietilen visoke gustoće |
| PE-LD | polietilen niske gustoće |
| PLA | polilaktid |
| PMMA | poli(metil-metakrilat) |
| PP | polipropilen |
| PPSF/PPSU | poli(fenilen-sulfon) |
| PVC | poli(vinil-klorid) |
| RM | brza (izravna) proizvodnja (e. <i>rapid manufacturing</i>) |

| | |
|------|--|
| RP | brza proizvodnja prototipa (e. <i>rapid prototyping</i>) |
| RT | brza proizvodnja kalupa ili alata (e. <i>rapid tooling</i>) |
| RTV | umreživanje kaučuka pri sobnoj temperaturi (e. <i>room temperature vulcanisation</i>) |
| SGC | tomografski postupak (e. <i>solid ground curing</i>) |
| SL | stereolitografija (e. <i>stereolithography</i>) |
| SLA | stereolitografija |
| SLM | postupak selektivnog laserskog taljenja (e. <i>selective laser melting</i>) |
| SLS | selektivno lasersko sraščivanje (e. <i>selective laser sintering</i>) |
| .STL | triangulizacijska datoteka (e. <i>standard tessellation language</i>) |
| UV | ultravioletno zračenje |
| VDID | njem. <i>Verband Deutscher Industrie – Designer</i> |
| YAG | itrij – aluminijev granat (e. <i>yttrium aluminium garnet</i>) |

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu predstavljeni su najzastupljeniji aditivni postupci te njihova primjena. Opisan je način provedbe čitavog postupka aditivne proizvodnje s naglaskom na *PolyJet Matrix* postupak. U eksperimentalnom dijelu rada napravljen je plan pokusa odzivne površine za ispitivanje rasteznih svojstava prema kojemu su izrađena ispitna tijela čiji su oblik i dimenzije definirani normom HRN EN ISO 527 – 2: 2012. Ulazni faktori za izradu plana pokusa su debljina prevlake i njena tvrdoća. Prema planu pokusa *PolyJet Matrix* postupkom su izrađena po tri ispitna tijela za svako od 20 stanja pokusa. Nakon izrade, ispitnim tijelima je provjerena dimenzijska točnost i izmjerena tvrdoća prije rasteznih ispitivanja. Dobiveni podaci su uneseni u programski paket *DesignExpert* i analiziran je utjecaj parametara prerade (tvrdoće i debljine) na rastezna svojstva (granica razvlačenja, modul elastičnosti, prekidna čvrstoća i prekidno istezanje).

KLJUČNE RIJEČI

Aditivni postupci, dimenzijska točnost, gumena prevlaka, metoda odzivnih površina, plan pokusa, PolyJet Matrix, rastezna svojstva, tvrdoća

SUMMARY

In this diploma thesis the most common *Additive Manufacturing* – *AM* processes and their applications are presented. It is also described how entire AM process is carried out with a focus on *PolyJet Matrix* process. In the second part of this paper a tensile test specimens are made according to design of experiment. Shape and dimensions of test specimens are defined by HRN EN ISO 527 – 2: 2012 standard. Input factors are thickness and hardness of specimens' coatings. 3 test specimens for each of 20 experiment states are made by using *PolyJet Matrix* process. After production, dimensional accuracy and hardness were measured. In the end specimens are subjected to tensile testing. The data was collected and entered into the *DesignExpert* software package. The result show influence of processing parameters (hardness and coating thickness) on the tensile properties.

KEY WORDS

Additive manufacturing, design of experiments, dimensional accuracy, hardness, PolyJet Matrix, response surface method, rubber coatings, tensile properties

1 UVOD

Želi li se napredovati u vremenu iznimno ubrzanog života, kojemu smo svjedoci, mora se ići u korak s vremenom. Ubrzanost se očitava u svim područjima ljudskog djelovanja pa tako i u tehnici. Proizvodi postaju sve kvalitetniji i složeniji, a konkurencija na tržištu nikad nije bila veća. Tržište zahtjeva visoku kvalitetu, uz nisku cijenu i kratke rokove isporuke. Iz tih su se razloga 1987. godine razvili postupci za brzu izradu prototipova da bi se moglo brže doći od zamisli do prototipnog proizvoda koji služi za daljnji razvoj ideje. Postupci za brzu izradu prototipova su se dalje razvijali u aditivne postupke. Oni predstavljaju potpuno novi način razmišljanja u odnosu na konvencionalne načine obrade poput CNC obrade tokarenjem ili glodanjem. Naime, u ovim se postupcima željeni proizvod dobiva slaganjem materijala sloj po sloj dok se ne dobije zadani oblik za razliku od uobičajenih postupaka obrade gdje se do proizvoda dolazi skidanjem slojeva materijala sa sirovca do željenog oblika. U aditivnim se postupcima uklanja potreba za planiranjem procesa izrade jer proizvod nastaje izravno iz modela. Ti postupci nisu u potpunosti orijentirani na izradu prototipova, već se sve više okreću proizvodnji konačnih proizvoda. Ograničenje predstavlja uski raspon materijala koji se mogu primjenjivati u ovim postupcima, međutim i na tom su planu vidljiva poboljšanja te se vjeruje kako ove postupke očekuje svijetla budućnost.

2 ADITIVNI POSTUPCI

2.1 Povijest aditivnih postupaka

Aditivni proizvodni postupci (AP) su se u industrijskoj uporabi pojavili 1987. godine kada je tvrtka *3D Systems* predstavila stereolitografiju (e. *stereolithography* - *SL*), postupak u kojem se tanki sloj kapljevito polimera skrućuje pomoću UV lasera. 1988. godine tvrtke *3D Systems* i *Ciba-Geigy* zajedno sudjeluju u razvitku i komercijalizaciji prve generacije akrilnih smola. 3DP je postupak 3D tiskanja koji je razvijen na sveučilištu MIT 1989. godine. Pravo na njenu primjenu kasnije dobiva nekoliko tvrtki koje na njoj zasnivaju svoje postupke 3D tiskanja. [1, 2]

1991. godine se komercijaliziraju tri postupka aditivne proizvodnje: postupak taložnog očvršćivanja (e. *fused deposition modeling* – *FDM*) tvrtke *Stratasys*, tomografski postupak (e. *solid ground curing* – *SGC*) tvrtke *Cubital* te laminiranje (e. *laminated object manufacturing* – *LOM*) tvrtke *Helisys*. U FDM-u tvorevina nastaje ekstrudiranjem slojeva plastomernih materijala dok se u LOM postupku lijepe i režu slojevi papira ili folije. Selektivno lasersko srašćivanje (e. *selective laser sintering* – *SLS*) tvrtke *DTM* (sada dio *3D Systems*-a) pojavljuje se 1992. godine. Kod SLS-a se materijali u obliku praha spajaju uz pomoć energije koju daje laser. Tvrtka *Soligen* je 1993. godine predstavila postupak izravne izrade kalupne ljuske (e. *direct shell production casting* – *DSPC*). Iste godine tvrtke *3D Systems* i *Ciba* izbacuju prvi komercijalni proizvod od epoksidne smole. Naredne godine tvrtka *SolidScape* predstavlja uređaj *ModelMaker* koji upotrebljava inkjet glavu za 3D tiskanje. Nakon što je osam godina prodavala stereolitografske sustave, tvrtka *3D Systems* je 1996. godine isporučila stroj za 3D tiskanje *Actua 2100* koji se zasniva na nanošenju voska sloj po sloj primjenom inkjet postupka. Iste godine, tvrtka *Z Corp* predstavlja svoj 3D pisač *Z402* koji radi tvorevine od škroba, gipsa u obliku praha i kapljevutih veziva. [1, 2]

U travnju 1999. godine tvrtka *Extrude Hone AM* (danas *Ex One*) pušta u rad *ProMetal RTS-300*, njihov prvi stroj za izradu metalnih dijelova čiji se rad temelji na 3DP postupku inkjet tiskanja razvijenom deset godina ranije na MIT-u. 2001. godine izraelska tvrtka *Objet Geometries* započinje s isporukom beta verzija svojih *Quadra* 3D pisača koji rade tako da se iz mlaznica na podlogu naštrcava kapljeviti fotopolimerni materijal koji očvršćuje pod svjetlom UV lampe. Tvrtka *Stratasys* 2001. godine započinje s isporukom modela *FDM Titan*, stroja na kojem je moguće izrađivati proizvode od polikarbonata (PC), akrilonitril/butadien/stirena (ABS), poli(fenilen-sulfon)-a (PPSU) ili mješavine polikarbonata i ABS-a. 2007. godine *Objet Geometries* predstavlja *Connex500*, stroj za 3D tiskanje koji se

temelji na postupku *PolyJet Matrix* koji može tiskati istovremeno dva materijala. Iste godine počinje i postupak normizacije pojmova i aditivnih postupaka. 2009. godine osnovan je odbor sastavljen od stručnjaka iz čitavog svijeta čiji je cilj bio da ustanove norme za testiranja, postupke, materijale, dizajniranje i terminologiju za potrebe novonastalih postupaka. Uvodi se pojam Aditivna Proizvodnja (e. *additive manufacturing* – AM). Iste godine tvrtka *Objet Geometries* za svoju *Connex* liniju *PolyJet Matrix* pisača izbacuje dodatnih 18 materijala čiji je raspon tvrdoća po Shore-u A od 27 do 95. U isto vrijeme predstavljaju i *TangoBlackPlus FullCure* materijal sa svojstvima sličnim gumi. 2012. godine dolazi do spajanja tvrtki *Objet Geometries* i *Stratasys*. [2]

2.2 Podjela i primjena aditivnih postupaka

Aditivnim postupcima proizvodnje tvorevina moguće je izraditi fizičke modele, prototipove, dijelove kalupa i alata i funkcionalne dijelove iz 3D računalnog modela tijekom konstruiranja s pomoću računala (CAD), komplicirane geometrije koje je teško ili uopće nije moguće napraviti nekim drugim postupcima. [1]

Na području razvoja proizvoda moguće je zamijetiti nekoliko trendova. Konstruiranju se posvećuje sve veća pozornost, sve je češća pojedinačna i maloserijska proizvodnja, potrebno je sve više voditi računa o zaštiti okoliša te je općenito skraćen vijek proizvoda na tržištu uz prisutan trajan pad cijena proizvoda na tržištu zbog vrlo jake konkurencije. Također se je pri razvoju proizvoda potrebno držati različitih propisa i normi, zahtijeva se interdisciplinarni pristup razvoju proizvoda, u proces razvoja proizvoda uključuje se sve više stručnjaka izvan matičnog poduzeća (multinacionalne kompanije), gdje je vrlo važno uspostaviti odgovarajuću komunikaciju između suradnika. Novi proizvodi su kompleksniji (funkcijski) i kompliciraniji (geometrijski), a vrijeme njihove proizvodnje treba biti što kraće. [3]

Nakon što se ideja o novom proizvodu definira u digitalnom obliku, u vrlo se kratkom vremenu s pomoću postupaka brze proizvodnje tvorevina može izraditi fizički ili čak i funkcijski model. Modeli tijekom razvoja proizvoda rabe se ponajprije radi poboljšanja kvalitete komunikacije između timova stručnjaka uključenih u razvoj te radi komunikacije s tržištem. S takvim tvorevinama moguće je analizirati ispunjavanje propisanih normi za proizvod, moguće je certificiranje proizvoda itd. Vrlo je bitna uloga prototipova i u ranom otkrivanju grešaka i propusta tijekom razvoja proizvoda. [3]

Prema definiciji VDI (njem. *Verband Deutscher Industrie – Designer*) postoji šest različitih tipova modela [3]:

- Razmjerni modeli
- Ergonomijski modeli
- Konstrukcijski modeli
- Funkcijski modeli
- Prototipovi
- Tvorevine

Modeli u pravilu predstavljaju trodimenzijski prikaz stvarne tvorevine u različitim mjerilima. Pri tome prototipovi predstavljaju samo jednu vrstu modela. [3]

Prototipove je također moguće podijeliti na reproduksijske i procesne prototipove. Reprodukcijski prototipovi vjerno prikazuju proizvod, no primjenjuju se samo u marketinške i eventualno u konstrukcijske svrhe uz određena ograničenja. Procesni prototipovi primjenjuju se za ispitivanje karakteristika razvijanog modela te za njihovo poboljšanje. Na primjeru injekcijskog prešanja, procesni prototipovi (npr. načinjeni u kalupu za izradbu prototipova) primjenjuju se za poboljšanje karakteristika otpresaka, ali i procesa injekcijskog prešanja, prije nego što se uopće započne s izradbom kalupa. [3]

Aditivna proizvodnja (e. *additive manufacturing – AM*) je termin u kojem su ujedinjene: brza izrada prototipova (e. *rapid prototyping – RP*), brza izrada alata (e. *rapid tooling – RT*) te brza izrada krajnjih proizvoda (e. *rapid manufacturing – RM*).

RP se može definirati kao skup postupaka kojima se može brzo izraditi model nekog dijela ili sklopa upotrebljavajući trodimenzionalni CAD model. Najčešće se radi o naslagivanju materijala sloj po sloj do konačnog oblika. Stereolitografija se smatra prvim postupkom RP-a pa se godina 1987. uzima kao početak razvitka brze proizvodnje tvorevina. [4]

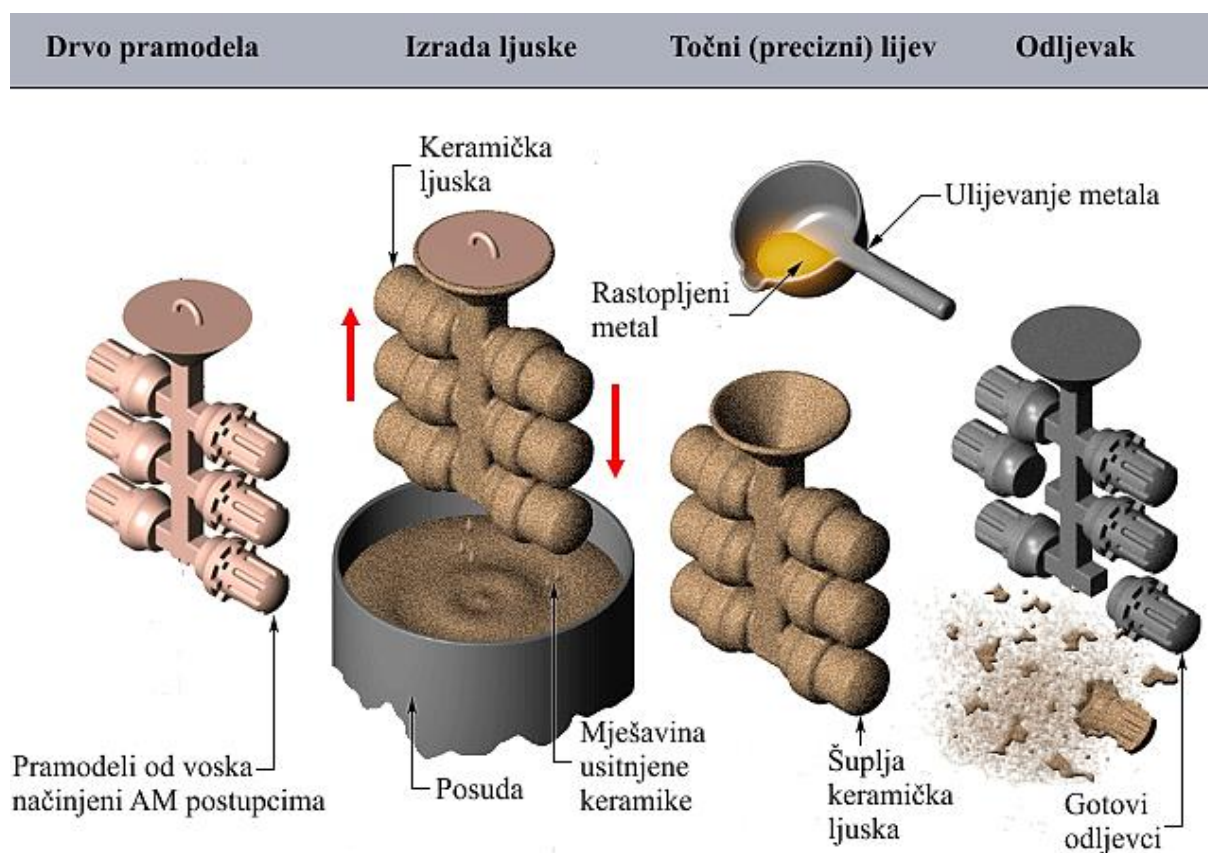
RT označava proces dobiven kombiniranjem konvencionalnih metoda izrade alata s brzom izradom prototipova kako bi se puno brže izradio kalup ili neka druga vrsta alata izravno iz podataka CAD modela. Na taj se način mogu izraditi dijelovi alata i kalupa ili čitavi kalupi. Iznimno su važni u industriji pošto se često javlja potreba za proizvodnjom manjeg broja prototipova ili testnih izradaka, a za te potrebe bi izrada konvencionalnih alata bila preskupa i u potpunosti neisplativa. Vrijeme izrade takvog alata je otprilike jednaka petini vremena koje bi bilo potrebno za izradu alata primjenom standardnih postupaka, a njihova cijena može biti i više nego 90 % niža. [5]

Postoji više podjela RT postupaka. prema prvoj RT postupci se dijele na [6]:

- **Izravni** – izravna proizvodnja elemenata kalupa RT postupcima (slika 2.1)
- **Posredni** – s pomoću AM postupaka se izrađuju pramodeli na temelju kojih se izrađuju elementi kalupa (slika 2.2)



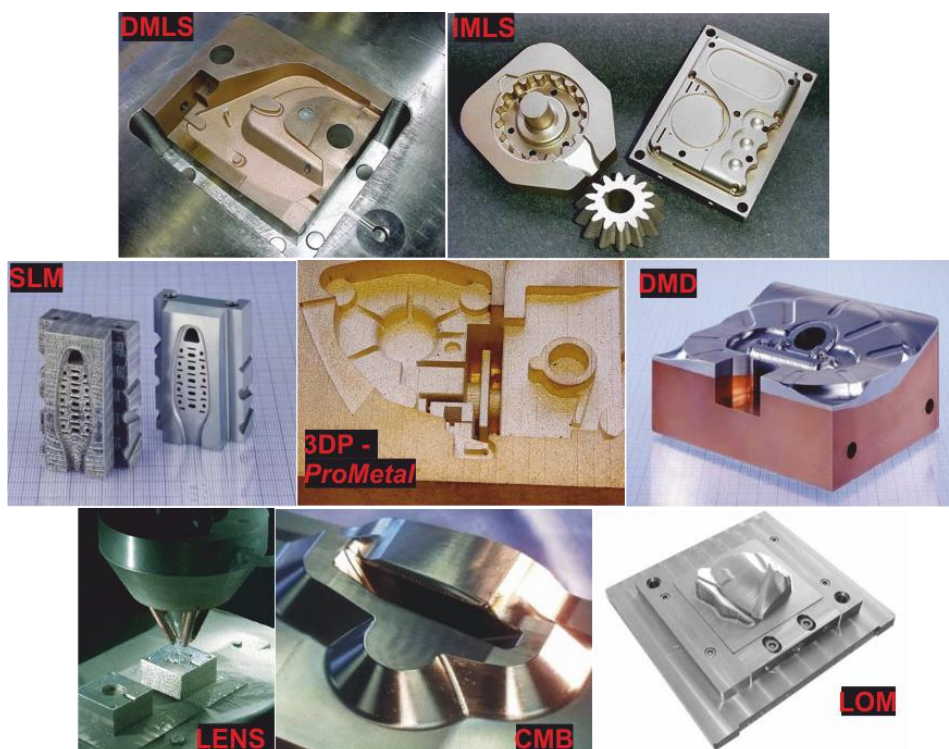
Slika 2.1. Čelični kalup za razvlačno puhanje načinjen postupkom izravnog srašćivanja metala s pomoću lasera (e. *Direct metal laser sintering - DMLS*) [7]



Slika 2.2. Shema postupka preciznog lijevanja za čije je potrebe kalup napravljen pomoću voštanog pramodela načinjenog aditivnim postupkom [8]

Prema drugoj sistematizaciji RT postupci dijele se na (slika 2.3) [6]:

- **Proizvodnja privremenih kalupa (e. *soft tooling*)** – za izradu nekoliko otpresaka
 - RTV silikonski kalupi
- **Proizvodnja prijelaznih kalupa (e. *bridge tooling*)** – za izradu nekoliko tisuća otpresaka
 - Izrada kalupa laserskim srašćivanjem metala u jednom koraku (e. *direct metal laser sintering – DMLS*)
 - Izrada kalupa laserskim taljenjem (e. *selective laser melting – SLM*)
 - Izrada kalupa 3D tiskanjem (e. *3D printing – 3DP*) – *ProMetal* postupak
- **Proizvodnja trajnih kalupa (e. *hard tooling*)** – za izradu više od 100 000 otpresaka
 - Izrada kalupa laserskim srašćivanjem metala u dva koraka (e. *indirect metal laser sintering – IMLS*)
 - Izrada kalupa laserskim taljenjem (e. *selective laser melting – SLM*)
 - Izrada kalupa taloženjem s pomoću laserske zrake (e. *laser deposition*) – *Direct Metal Deposition – DMD*, *Laser Engineered Net Shaping - LENS*, *Controlled Metal Buildup - CMB*
 - Izrada kalupa izradom slojeva (različitim postupcima rezanja) i njihovim povezivanjem u gotovi (e. *laminated object manufacturing – LOM*)



Slika 2.3. Primjeri kalupnih umetaka izrađenih različitim RT postupcima [6]

Prednosti RT-a [6]:

- Kratak rok izrade elemenata kalupa ili čitavih kalupa
- Moguća izrada vrlo kompliciranih geometrijskih oblika
- Moguće optimalno temperiranje kalupa (e. *conformal cooling*) – kraći ciklusi, optimalna kvaliteta otpresaka
- Moguća primjena za popravak oštećenih kalupa

Nedostaci RT-a [6]:

- Još uvijek veoma skupa oprema, materijali i usluge
- Ograničen broj raspoloživih materijala (u stalnom porastu)
- Ograničena trajnost dijelova kalupnih umetaka
- Lošija površinska svojstva (hrapavost površine)
- U slučaju oštrijih tolerancija izmjera, većina postupaka ne zadovoljava (potrebna naknadna obrada)

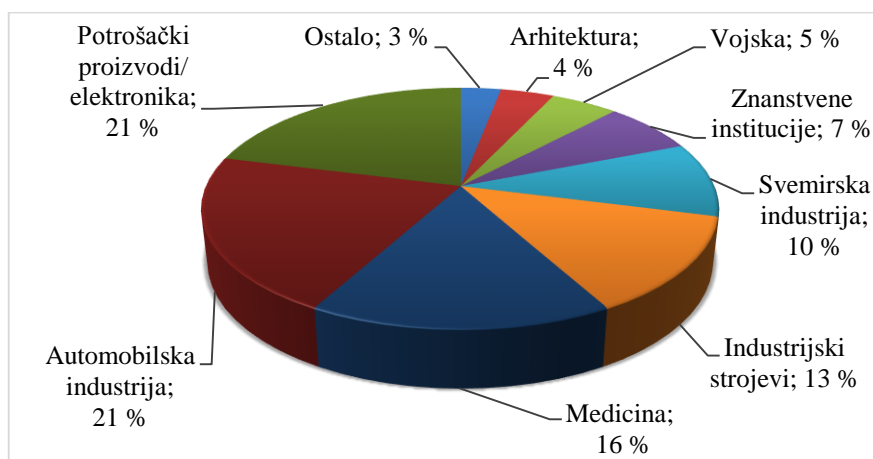
Ono čemu se po prirodi teži nakon RP-a i RT-a je brza proizvodnja krajnjih proizvoda odnosno RM. To se područje ubrzano razvija iako još ne postoji široka paleta proizvoda na tržištu. Razlog leži u ograničenjima postupaka koja i dalje predstavljaju prepreku i u njihovo se rješavanje ulažu veliki naponi.

Ograničenja AM postupaka [9]:

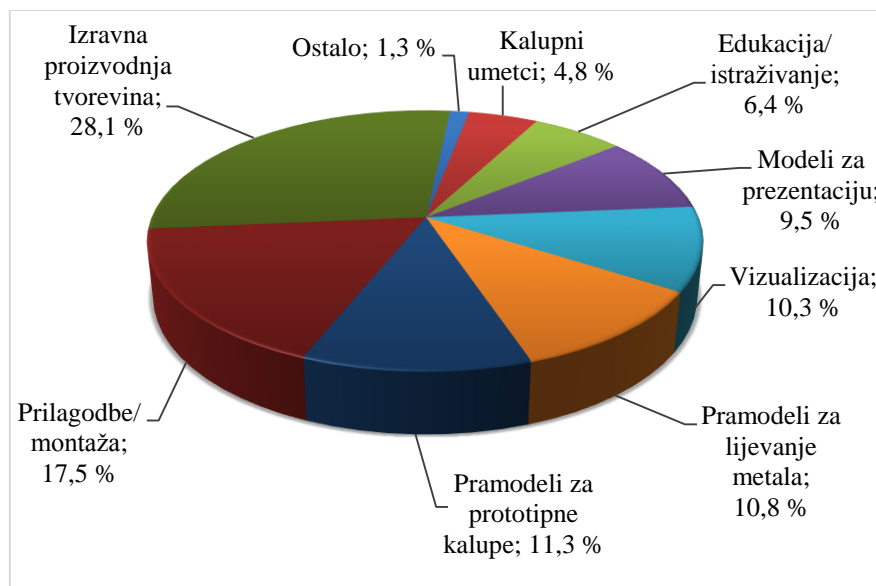
- **Debljina sloja izrade** - Prosječna debljina sloja od 0,1 mm još uvijek je prevelika za neke primjene. Na tržištu se mogu pronaći uređaji koji omogućuju debljine do 0,02 mm, ali činjenica je da smanjenje debljine sloja povlači sa sobom povećanje cijene AM uređaja i duže vrijeme izrade modela. Svi modeli dobiveni AM postupcima pokazuju stepenastu strukturu koja je posebno izražena na kosim površinama zbog čega je često potrebna naknadna obrada modela.
- **Dimenzijska točnost izrade** - Osim debljine sloja ispisa, postoji još čitav niz stavki koje utječu na dimenzijsku postojanost modela. Posebnu pozornost privlače modeli proizvoda koji imaju vrlo tanke stijenke, jer oni predstavljaju problem kod izrade AM postupcima. Tanke stijenke (npr. boce, limenke) izrađene na AM uređajima često imaju debljinu i po nekoliko milimetara.
- **Materijali** – Izbor materijala je ograničen s obzirom na postupak izrade. Tako u nekim postupcima materijal mora biti u obliku praha, negdje u kapljevitom obliku a negdje u obliku folije ili žice. Dostupni materijali određuju i svojstva koja je moguće dobiti upotrebom AM postupaka.

- **Veličina modela** - Činjenica je da su svi uređaji za brzu izradu tvorevina ograničeni radnim prostorom. Sama veličina radne komore AM uređaja određuje i veličinu modela koji želimo izraditi. Većina AM uređaja imaju veličinu platforme do 300x300x300 mm te je trenutno velike modele jedino moguće izraditi iz više dijelova koji se kasnije spajaju ili u odgovarajućem mjerilu iako su na tom području vidljiva poboljšanja u pogledu strojeva koji su u mogućnosti izrađivati velike izratke.
- **Ispis u boji** - Skoro svi AM postupci imaju mogućnost izrade modela u boji, ali istovremeno mogu upotrijebiti samo jednu boju i ograničene su na paletu od tri do sedam boja. Jedini uređaj koji ima „pravu“ mogućnost ispisa u boji je 3D pisac tvrtke *Zcorp (3D Systems)* iz SAD-a. Za nanošenje boje uređaj upotrebljava injekt glavu s tri osnovne boje, te ima mogućnost reprodukcije 180 000 boja. Boja se na model nanosi u sloju debljine 1 mm od površine, tako da nije moguće skidanje boje ili depigmentacija. U boji se može izrađivati i primjenjujući *PolyJet Matrix* postupak koji miješa 3 boje i tako dobiva razne nijanse kojima se izrađuju tvorevine. Boja na 3D modelima je vrlo bitna u današnje vrijeme zbog lakšeg prikaza pozicija u sklopovima, rezultata numeričkih analiza te modela koji se primjenjuju u arhitektonske, medicinske i ostale svrhe.

Kako su se tehnologije razvijale, postupci su našli sve veću primjenu na različitim područjima. Najviše se upotrebljavaju za proizvodnju potrošačkih proizvoda/elektronike, te u automobilskoj industriji, dok najmanje u arhitekturi (slika 2.4). Slika 2.5 prikazuje strukturu primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina.



Slika 2.4. Područja primjene AM postupaka u 2013. godini [10]



Slika 2.5. Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2013. godini [10]

2.3 Trendovi u aditivnoj proizvodnji [11]

U proteklim godinama došlo je do velikog napretka na nekim područjima povezanim s aditivnom proizvodnjom pa se time razvijaju i sami aditivni postupci. Poboľšanja su vidljiva na području rada s metalima, razvitku novih informatičkih alata za dizajniranje, a također su istekla i prava prvenstva na određene ključne patente.

Aditivna proizvodnja se počela shvaćati kao ozbiljna metoda proizvodnje što još donedavno nije bio slučaj. Npr. *Boeing* danas proizvodi više od 200 različitih dijelova za svoje zrakoplove postupkom aditivne proizvodnje. Gotovo 40 000 dijelova ljudskih kosti proizvedeno je postupkom srašćivanja praha upotrebom fokusirane zrake elektrona u podtlaku (e. *electron beam melting – EBM*), a otprilike polovica od tog broja je i implementirana u pacijente. Više od 10 000 metalnih kapica se proizvodi na dnevnoj bazi za potrebe izrade zubnih kruna i mostova. S razvojem i testiranjem novih AM postupaka te usklađivanjem industrijskih normi može se očekivati sve veća raznolikost izradaka iz raznih područja.

ASTM-ov međunarodni F42 (e. *ASTM International F42 Comitee on Additive Manufacturing Technologies*) ima ključnu ulogu u napretku industrije aditivne proizvodnje. Oni kontinuirano rade na razvitku novih industrijskih standarda, terminologije, testiranja, materijala te dizajniranja te tako uvelike utječu na organiziranost te grane industrije i njezin razvitak.

Kada je isteklo originalno pravo prvenstva na dijelove patenta FDM postupka kojeg je patentirao Scott Crump, suosnivač tvrtke *Stratasys*, omogućeno je projektima kao što je

RepRap da postanu komercijalno dostupni. To je dovelo do prodaje više od 20 000 3D pisača u 2011. godini.

U lipnju 2014. godine istekao je dio patenta dr. Carla Deckarda na SLS postupak što je omogućilo upotrebu tog postupka za razvitak novih široko dostupnih načina proizvodnje.

Kao što je to bio slučaj s ta dva postupka tako će i patenti ostalih postupaka jednom isteći što će omogućiti kreativnim pojedincima i organizacijama da ih iskoriste i ponude na tržište nove postupke temeljene na, zasad, patentiranim postupcima.

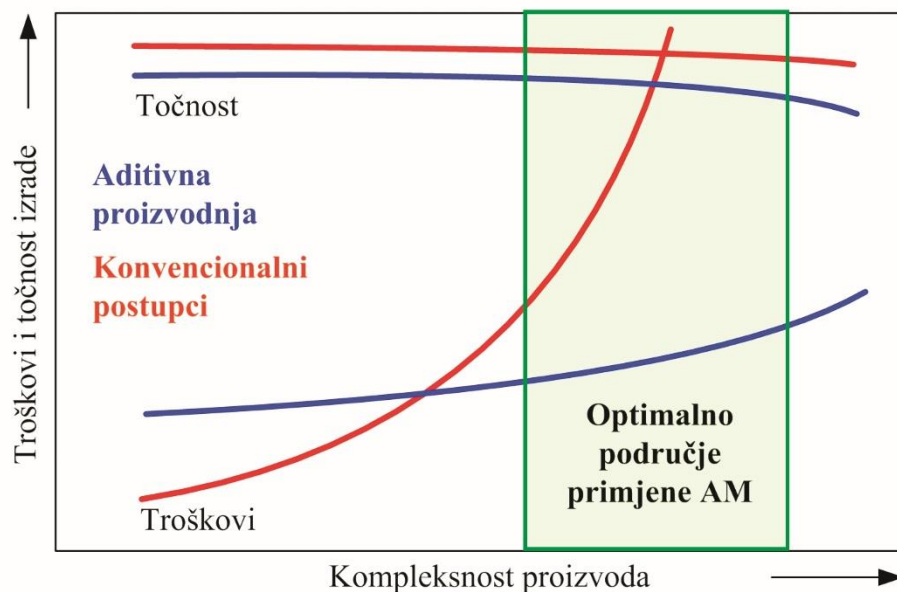
Razvoj novih AM postupaka je u tijeku, tako je npr. na sveučilištu *Loughborough* u tijeku razvoj postupka koji je potencijalno brži od laserskog sraščivanja. U pitanju je visoko – brzinsko sraščivanje (e. *high speed sinter*) koje je u mogućnosti izrađivati čitav sloj odjednom postupkom *printoptical* razvijenim od strane tvrtke *LUXeXcel Group B.V.*. Na ovaj je način moguće proizvoditi prozirne tvorevine, poput leća, bez potrebe za bilo kakvom naknadnom obradom.

Nove vrste strojeva će se i dalje razvijati. Neki će biti konstruirani za generalnu upotrebu u postupcima izrade prototipova i izradu proizvoda, dok će se ostale tvrtke pokušati probiti na tržište razvojem posebnih materijala odnosno specifičnih veličina i vrsta dijelova.

2.4 Razlika između aditivne i CNC proizvodnje

U nekim su značajkama AM i CNC proizvodnja slični. Izrada proizvoda i jednim i drugim postupkom se temelji na računalima odnosno računalnim programima. Ono po čemu se očito najviše razlikuju je pristup obradi pošto se kod AM materijal dodaje sloj po sloj dok se kod CNC proizvodnje materijal oduzima od sirovca određenih dimenzija da bi se dobio željeni oblik. Na tome bi se mogle temeljiti mnoge usporedbe, ali nije cilj da se ustanovi koji je postupak bolji, već kako da ih se implementira zajedno u određene dijelove proizvodnje.

Na slici 2.6 prikazano je područje kad je opravdano primijeniti AM postupke u odnosu na klasične postupke prerade.



Slika 2.6. Opravdanost primjene aditivnih postupaka [12]

2.4.1 Materijal

AM postupci su u svojoj osnovi razvijani za upotrebu polimernih materijala, voska te laminata papira, a kasnije su se počeli upotrebljavati i kompoziti, metali i keramika. CNC obradom se mogu obrađivati meki materijali poput vlaknastih ploča srednje gustoće (e. *medium – density fiberboard – MDF*), strojno obradiva pjena i vosak pa čak i neki polimeri. Izrada konačnih izradaka primjenom CNC obrade funkcionira najbolje ako se primjenjuju tvrdi materijali poput čelika te se dobivaju dijelovi visoke točnosti i točno definiranih svojstava. S druge strane, neki dijelovi napravljeni AM postupcima mogu sadržavati šupljine ili imati anizotropna svojstva što ovisi o orijentaciji same tvorevine u radnom prostoru stroja te parametrima postupka. Dijelovi izrađeni CNC postupkom obično imaju puno homogeniju strukturu i predvidljivija svojstva. [8]

2.4.2 Brzina

Visoko – brzinska CNC obrada općenito može puno brže skidati materijal sa sirovca nego što AM može dodati isti volumen materijala. Međutim, taj podatak treba uzeti sa zadržkom pošto se aditivnom proizvodnjom može izraditi čitav proizvod u jednom koraku. CNC obrada zahtjeva iscrpno pripremanje i planiranje proizvodnog procesa, osobito ako je geometrija proizvoda složenija. Brzina se, iz tog razloga, mora promatrati s aspekta izrade cijelog proizvoda, a ne samo dio gdje se materijal skida odnosno dodaje. CNC obrada je često više-fazni postupak koji zahtjeva promjenu položaja ili orijentacije obratka unutar stroja, a nerijetko i upotrebu više različitih strojeva. Osim što se mogu izrađivati višedijelni proizvodi

u jednom koraku AM postupcima je moguće u isto vrijeme izrađivati i više različitih dijelova neovisnih jedan o drugome. [8]

2.4.3 Složenost

Što je veća složenost izradaka veće su i prednosti AM postupaka naspram CNC obrade. Prilikom CNC obrade prepreku izradi proizvoda u jednom koraku često predstavljaju neke značajke koje iz nekog razloga nije moguće izraditi. Razlog može biti u nepristupačnosti nekih dijelova proizvoda. AM postupci nemaju takvih problema i njima se mogu napraviti bilo kakve značajke na proizvodima jer nisu ovisni o pristupačnosti (slika 2.7). Dakle, za CNC obradu je potrebna temeljna priprema procesa i neki se dijelovi moraju razdvojiti na dva ili više njih kako bi se mogli točno proizvesti pa se onda kasnije sklapaju u cjelinu. Dobar primjer je model broda u boci kojeg je moguće sastaviti posebnim metodama dio po dio što iziskuje iznimnu spretnost. Drugi način je da se boca prereže i, nakon što se u nju stavi brod, ponovno sastavi. Treći način bio bi da se brod i boca izrađuju istovremeno aditivnim postupcima. To bi iziskivalo analizu dijelova koje je potrebno izraditi i mogućnosti njihove izrade postojećim postupcima, ali u osnovi bi trebalo biti moguće da se takav proizvod izradi u jednom koraku. [8]



Slika 2.7. Nakit komplicirane geometrije proizveden postupkom očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom [1]

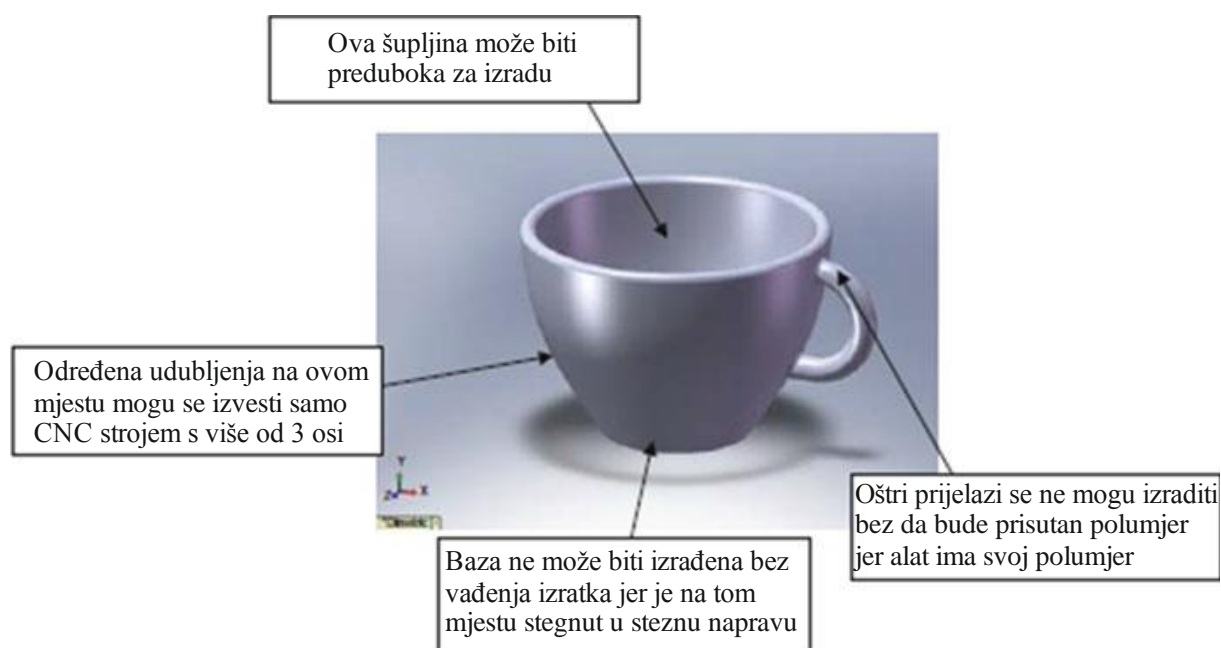
2.4.4 Točnost

Strojevi za AM najčešće rade na rezoluciji od nekoliko desetaka mikrometara. Njihova je uobičajena karakteristika da na različitim ortogonalnim osima imaju i različitu rezoluciju. Vertikalna os odgovara debljini sloja materijala koji se nanosi i njena je rezolucija manja od

rezolucije izrade po osima u ravnini samog sloja. Njihova pak rezolucija ovisi o mehanizmima i motorima zaslužnima za kretanje alata po osima u ravnini sloja kao i postupku i alatu koji se upotrebljava za izradu slojeva. S druge strane, točnost CNC strojeva je određena rezolucijom pozicioniranja po osima te promjerom alata za skidanje materijala. Tu su također značajke alata koje utječu na preciznost izrade poput radijusa zaobljenja te kutova alata. Kod AM minimalna debljina stijenke tvorevine ovisi o alatu koji se primjenjuje (npr. kod postupka laserskog srašćivanja ovisi o promjeru laserske zrake) dok kod CNC postupka možemo dobiti stijenke tanje od promjera alata pošto je to postupak skidanja materijala. U oba slučaja na točnost izrade utječu i željena geometrija tvorevine te svojstva materijala koji se upotrebljava. [8]

2.4.5 Geometrija

Kod AM postupaka komplicirana 3D geometrija se reže u jednostavne poprečne 2D slojeve određene debljine. Zbog toga je AM postupcima moguće izraditi komplicirane geometrije. Kod CNC obrade pristup je drugačiji te se sve obrade izvode u 3D prostoru. To nije problem s jednostavnijim oblicima poput valjaka, kvadara ili konusnih dijelova gdje je putanja alata određena točkama koje su dovoljno udaljene jedne od drugih, a njegova je orijentacija fiksna. Međutim, kad se radi o složenijim oblicima površine gdje su točke blizu jedna drugoj, a promjene orijentacije alata česte tada se stvar komplicira i takve oblike često nije moguće izraditi ni peteroosnim CNC strojevima. Primjer problema s izradom pojedinih značajki na izratku primjenom CNC obrade vidi se na slici 2.8. [8]



Slika 2.8. Neke od značajki koje predstavljaju problem pri CNC obradi [8]

2.4.6 Programiranje

Izrada programa za CNC stroj može biti komplicirana jer je u sklopu njega potrebno izabrati alat, ustanoviti brzine obrade, odrediti pozicije i kutove nagiba alata, itd. Dakako da je i kod AM postupaka potrebno odrediti neke parametre, ali njihova kompliciranost i kvantiteta su puno manje. Najgore što se može dogoditi ako se pogriješi u programiranju za AM je da proizvod ne bude napravljen kako treba. Kod CNC strojeva posljedice mogu biti mnogo ozbiljnije te mogu uključivati oštećenja na stroju pa čak i opasnost po ljudski život. [8]

2.5 Faze AM postupaka

Aditivna proizvodnja uključuje nekoliko koraka da bi se od virtualnog CAD modela došlo do krajnje tvorevine. Detaljnost pojedinih koraka ovisit će o tome kakav proizvod se izrađuje i u kojoj se fazi izrade nalazimo. Kod manjih i jednostavnijih proizvoda AM postupci se upotrebljavaju uglavnom za proizvodnju vizualizacijskih modela dok se kod većih i kompleksnijih proizvoda u kojima je potreban inženjerski pristup za pronalaženje najprihvatljivijih konstrukcijskih i ostalih rješenja AM postupci uključuju na više različitih razina razvoja proizvoda. Nadalje, kod ranijih razina razvoja proizvoda se često javlja potreba samo za grubim modelom pa je tu poželjna aditivna proizvodnja zbog svoje brzine. Na kasnijim razinama razvoja može se javiti potreba za dijelovima čija je geometrija iznimno kompleksna, a pošto AM postupci nemaju problema s izradom takvih dijelova nameću se kao dobar izbor. Faze aditivnih postupaka su (slika 2.9) [8] :

- Izrada CAD modela
- Pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- Prebacivanje STL datoteke na AM stroj
- Podešavanje parametara AM stroja
- Izrada tvorevine
- Vađenje tvorevine iz stroja
- Naknadna obrada, ako je potrebna
- Primjena



Slika 2.9. Faze AM postupaka [1]

2.5.1 CAD model [8]

Prva i osnovna faza aditivnih postupaka je dobivanje CAD modela. Model se može izraditi modeliranjem u nekom od 3D CAD računalnih programa ili 3D skeniranjem gotovih tvorevina.

2.5.2 Prebacivanje u STL datoteku [8]

Gotovo svi AM postupci upotrebljavaju STL datoteku. Izraz je izveden od riječi stereolitografija (e. *STereoLithography*), prvog komercijalno dostupnog AM postupka. STL je postao standard kojim se jednostavno opisuje geometrija CAD modela. U STL datoteci se aproksimira površina modela nizom povezanih trokutastih oblika. U većini CAD alata to je moguće napraviti bez prevelikih poteškoća. Dakle ova vrsta datoteke opisuje samo geometriju površine izratka bez bilo kakvih drugih informacija u pogledu teksture, boja, materijala i slično. Ta su ograničenja dovela do razvitka AMF datoteke. Taj format je postao međunarodni ASTM/ISO standard koji proširuje mogućnosti STL formata dodajući mogućnost uključivanja informacija o dimenzijama, boji, materijalima i mnogim drugim svojstvima. Taj će format ubrzo postati dostupan u svim boljim CAD alatima pošto ima sve značajke STL formata uz mnogo manje izraženih nedostataka.

2.5.3 Prebacivanje datoteke na AM stroj [8]

Nakon što je STL datoteka pripremljena i provjerena šalje se u sustav AM stroja. Međutim u ovoj fazi se mogu napraviti i neke izmjene ukoliko je to potrebno. Može se, primjerice, promijeniti orijentacija izratka ili njegov položaj na radnoj plohi. Ponekad se istovremeno izrađuje više od jednog dijela te ih je potrebno razmjestiti po radnoj površini na prikladan način. Također je dio moguće povećati odnosno smanjiti ili unijeti male izmjene u STL datoteku poput dodavanja nekog teksta i slično.

2.5.4 Podešavanje parametara AM stroja [8]

Svaki AM stroj ima neki specifični parametar za podešavanje svojstven samo tom stroju ili postupku izrade. Ukoliko stroj radi s malim brojem različitih materijala tada se podešavanje svodi uglavnom na određivanje debljine sloja koji se izrađuje u jednom prolazu, brzine izrade i slično. Međutim ako stroj radi s više raznolikih materijala, parametara koje treba podesiti je puno više i kvaliteta krajnjeg proizvoda će ovisiti o tome koliko su dobro prilagođeni parametri proizvodu koji se izrađuje. Uz određivanje parametara također je potrebno osigurati dostatnu količinu materijala za izradu, očistiti osjetljive dijelove stroja te pripremiti radnu plohu.

2.5.5 Izrada tvorevine [8]

Prve četiri opisane faze su djelomično automatizirane, ali je kod njih ipak potreban operater da obavi određene poslove i podešavanja te da donese neke odluke. Nakon što su te faze ispunjene započinje postupak izrade proizvoda koji je upravljan računalom. Stroj tada slaže sloj po sloj materijala sve dok izradak ne poprimi zadani oblik.

2.5.6 Vađenje i čišćenje tvorevine [8]

Idealno bi bilo da možemo izvaditi proizvod iz AM stroja i početi ga upotrebljavati. To najčešće nije slučaj, već je potrebno provesti naknadnu obradu da bi izradak bio spreman za upotrebu. Potrebno je najčešće odvojiti ga od ploče na kojoj je izrađivan ili od viška materijala koji ga okružuje. Kod nekih se postupaka primjenjuje i dodatni potporni materijal da bi se određene strukture mogle napraviti. Taj se materijal na neki način mora ukloniti. Postupak uklanjanja često zahtjeva određenu razinu spretnosti operatera pošto bi njegove greške mogle dovesti do oštećenja izratka. Postupak čišćenja smatra se prvim dijelom procesa naknadne obrade.

2.5.7 Naknadna obrada [8]

Naknadna obrada uključuje specifične postupke završne obrade koji ovise o uvjetima u kojima će se proizvod primjenjivati. U ovoj se fazi provode razni abrazivni postupci, poput poliranja ili pjeskarenja te prevlačenje potrebnim prevlakama. Način i detaljnost obrade ovise o primjeni te je za neke proizvode naknadna obrada minimalna dok je za neke druge iznimno temeljita. Za dobivanje nekih svojstava potrebne su kemijska ili toplinska obrada. Pošto se ne može svim AM postupcima dobiti dimenzijska točnost proizvoda ponekad je potrebna i strojna obrada do određenih tolerancija.

2.5.8 Primjena [8]

Nakon što se obave potrebne naknadne obrade dio je spreman za upotrebu. Važno je imati na umu da iako su neki AM proizvodi izrađeni od sličnih materijala kao proizvodi drugih postupaka, njihova svojstva mogu se bitno razlikovati. Moguće je da prilikom izrade nekog proizvoda u njemu ostanu zarobljene male šupljine što može uzrokovati deformacije pri izlaganju mehaničkim opterećenjima. Također, ponekad se materijal ne poveže ili ne kristalizira na optimalan način, a ono što je gotovo redovit slučaj je anizotropija. Materijali koji se upotrebljavaju za AM, te AM postupci se brzo razvijaju i poboljšavaju pa bi konstruktori trebali biti svjesni napretka na tim područjima da mogu na najbolji način upotrijebiti ono što im se nudi pri konstruiranju proizvoda.

2.6 Postupci aditivne proizvodnje

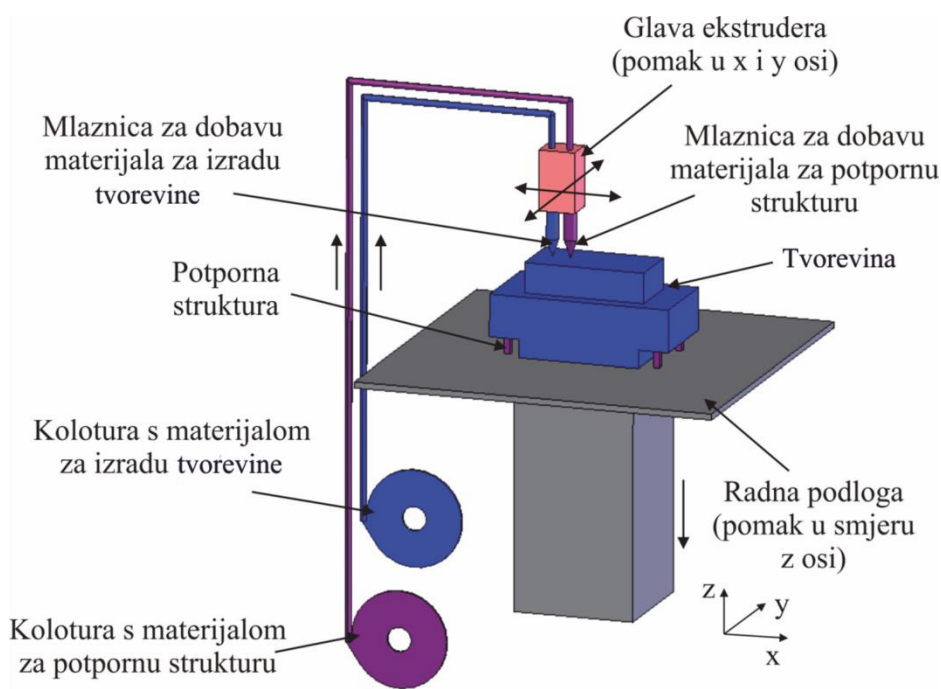
Postupci aditivne proizvodnje se mogu podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal na bazi krutine (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevine i praha. Takva podjela prikazana je u tablici 2.1 zajedno s najznačajnijim postupcima i materijalima koje upotrebljavaju. [1]

Tablica 2.1. Podjela AM postupaka prema korištenom materijalu [1]

| Stanje materijala | Postupak | Materijali |
|-------------------|---|--|
| Na bazi krutine | Taložno očvršćivanje (FDM) | Plastomeri [ABS, polietilen visoke gustoće (PE-HD), polietilen niske gustoće (PE-LD), polipropilen (PP), PC, poli(fenilen-sulfon) (PPSU), poliamid (PA), PLA], keramika, drveno – plastomerni kompoziti |
| | Proizvodnja laminiranih objekata (LOM) | Polimer u obliku folije, poli(vinil-klorid) (PVC), papir, metalne ploče |
| Kapljeviti | Stereolitografija (SLA) | Fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole [npr. poli(metil-metakrilat) (PMMA), epoksidna smola (EP), PE-HD], keramika |
| | Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom | Fotoosjetljiva polimerna smola |
| | PolyJet | Fotoosjetljiva polimerna smola |
| Praškasti | Selektivno lasersko srašćivanje (SLS) | Polimeri (PA, PS, PMMA), ojačani polimeri (npr. sa staklom), polimeri s raznim punilima, keramika, metali |
| | 3D tiskanje (3DP) | Polimeri (PMMA), keramika, škrob, gips, metali, pijesak |

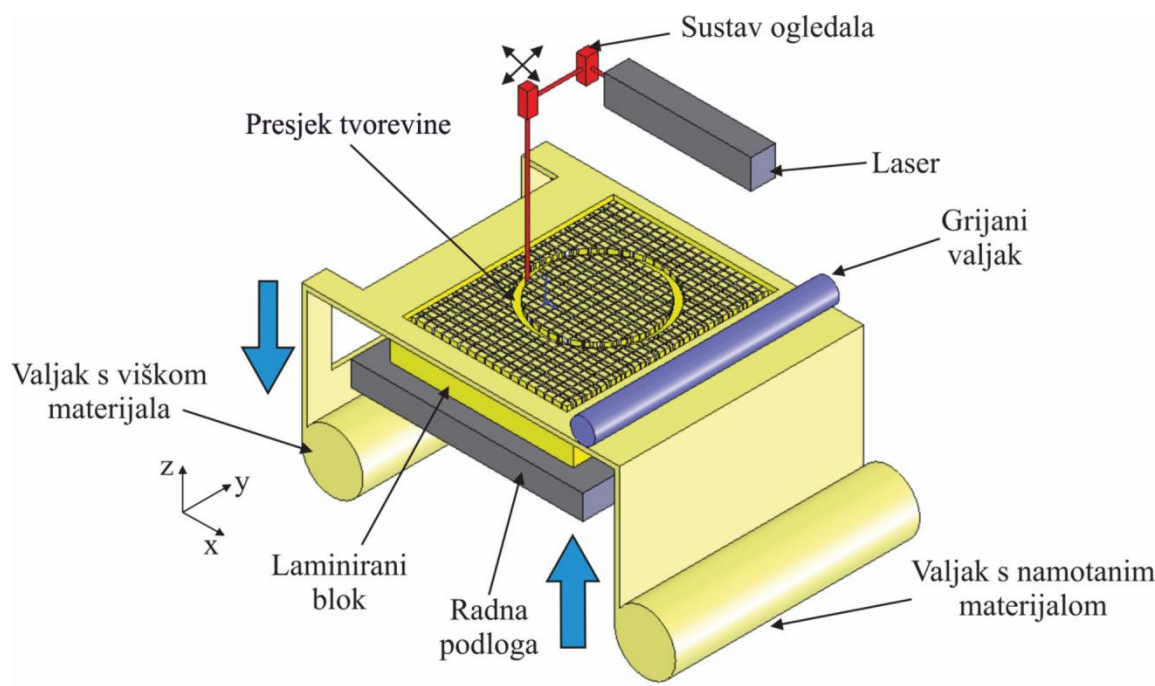
Taložno očvršćivanje materijala (e. *Fused Deposition Modeling* – FDM) (slika 2.10) aditivni je postupak koji je originalno razvijen u tvrtci *Advanced Ceramics Research (ACR)* u Tucson, Arizona, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*, Minnesota, SAD. Postupak započinje od 3D CAD modela, koji je računalnim programom podijeljen u vodoravne slojeve. Polimerni materijal u obliku žice (npr. ABS) ili vosak prolazi kroz mlaznicu, koja je upravljana s pomoću računala. Materijal napušta mlaznicu u omekšanom stanju i pri sobnoj temperaturi

brzo očvršćuje, pa je zbog toga potrebno održavati temperaturu kapljevitog materijala malo iznad temperature očvršćivanja. Cijeli sustav je u temperiranoj okolini (pri temperaturi neposredno ispod tališta materijala), pa se smanjuje potrošnja energije. Nakon izrade prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu novog sloja i ekstrudira se novi sloj. [1]



Slika 2.10. Shema FDM postupka [1]

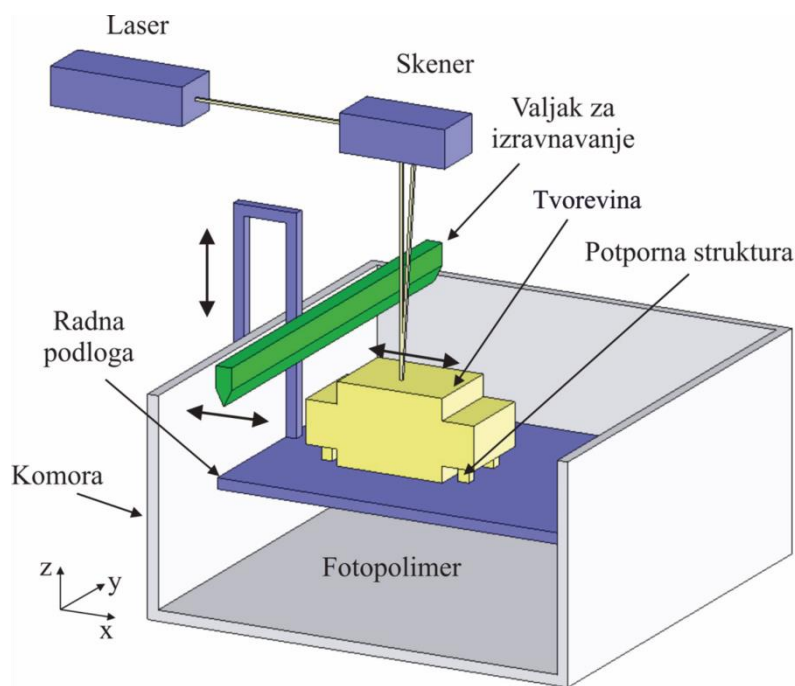
Postupak proizvodnje laminiranih objekata razvijen je 1985-te godine u tvrtki *Helisys*, SAD. Njime se proizvodi tvorevina laminiranjem i laserskim dovršavanjem (rezanjem) materijala od papira, polimernih filmova i folija, te od metalnih ploča. S polimernim folijama postižu se bolja mehanička svojstva u usporedbi s papirom. Ploče se laminiraju u čvrste blokove povezivanjem: ljepilom, stezanjem i ultrazvučnim zavarivanjem. Primjenjujući toplinu i tlak svaka se ploča, folija ili papir spaja na blok i formira novi sloj. Materijal se dobavlja s pomoću valjka na jednoj strani stroja i odmotava do druge strane (slika 2.11). Zagrijani valjak osigurava tlak i toplinu potrebnu da se novi sloj lijepi na već izrađeni dio tvorevine. Radna podloga spuštana je za debljinu folije, koja je obično debljine od 0,07 mm do 0,2 mm. (Slika 2.10). Nakon što se sloj (folija) staložio, laserskom zrakom izrezuje se dio materijala u oblik konačne tvorevine. Obično se primjenjuje CO₂ laser snage 25 W ili 50 W. [1]



Slika 2.11. Shema LOM postupka [1]

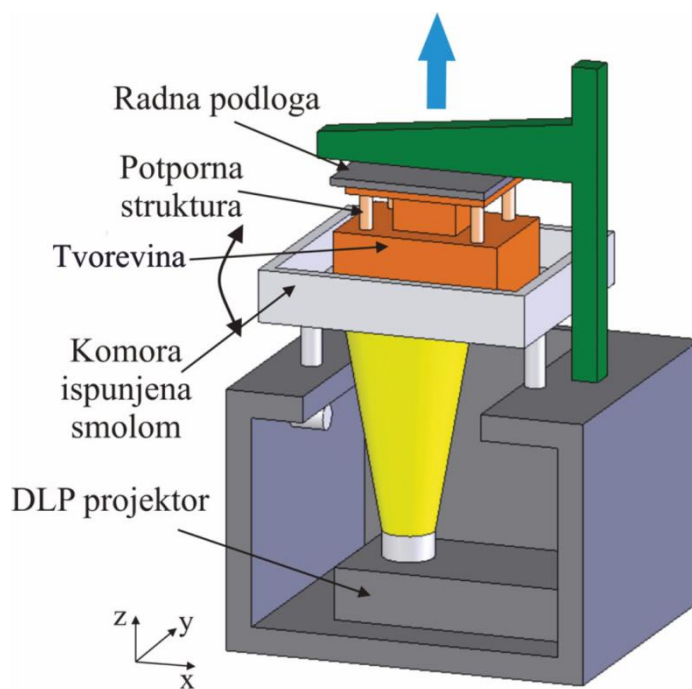
Stereolitografija (SLA), prvi komercijalno dostupan AM postupak, je opisana pretvorbom kapljevite fotoosjetljive smole u kruto stanje selektivnim izlaganjem smole laserskoj zruci. Princip stereolitografije (slika 2.12) je da se fotopolimer skrućuje kada je izložen izvoru svjetlosti. Radna podloga smještena je samo jedan sloj debljine ispod vrha površine kapljevito polimera. Helij - kadmijski (He - Cd) ili argonski (Ar) laser generira i fokusira UV svjetlost i skenira sloj polimera iznad podloge koji očvršćuje. Taj korak počinje s najdonjim presjekom tvorevine. Radna podloga se zatim spušta prema dolje za debljinu idućeg sloja. Valjak za izravnavanje kapljevine fotopolimera služi za izbjegavanje mjehurića zraka u tvorevinama. Kako se tvorevine proizvode u kapljevini, potrebno je osigurati položaj tvorevine s pomoću potporne strukture, koja se uklanja nakon završetka postupka. Postupak se ponavlja do konačne proizvodnje. Tvorevina se vadi iz kapljevito polimera, a višak polimera se ispire u otapalu, čime nastaje tzv. "zelena faza". Naknadno umreživanje odvija se minimalno 1 sat izlaganjem naknadnom zračenju. Taj korak potreban je zbog toga što se neka kapljevita područja mogu zadržati u slojevima, ali i za dodatno umreživanje gotove tvorevine.

[1]



Slika 2.12. Shema SLA postupka [1]

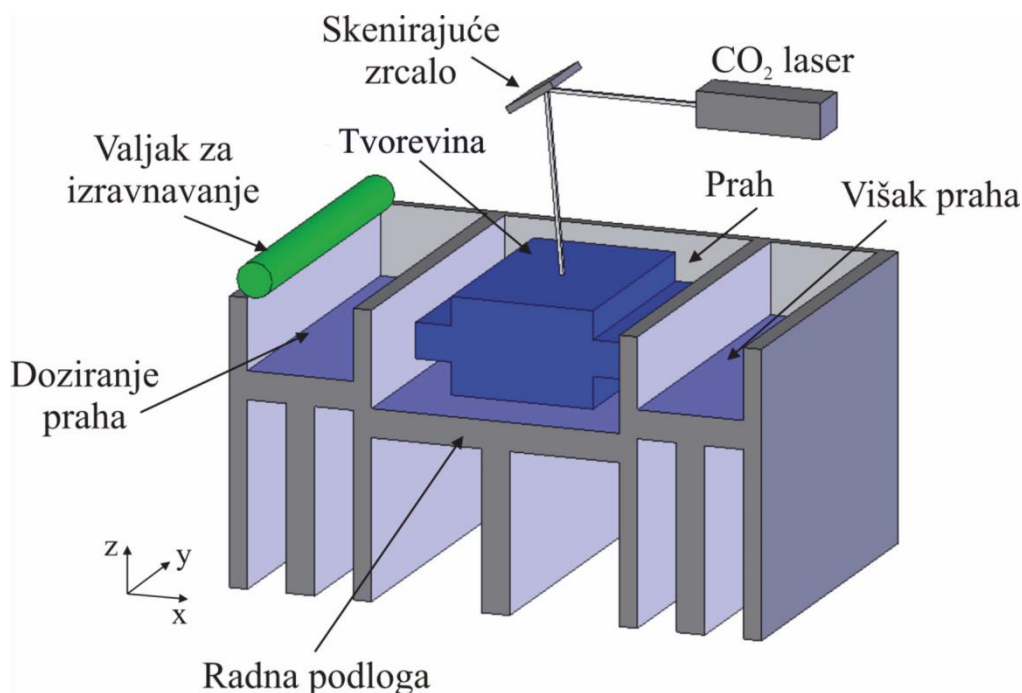
Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (slika 2.13) je izrada 3D modela s pomoću fotoosjetljive akrilne smole i *Digital Light Processing - DLP* postupka. Projicirana slika iz DLP izvora svjetlosti predstavlja presjek tvorevine koji očvršćuje u polimernoj smoli. Vidljiva svjetlost se projicira ispod radne podloge, tako da se radna površina nalazi iznad nje. Uređaj osvijetli cijeli sloj odjednom čime se skraćuje ukupno vrijeme ciklusa (10 s do 15 s ovisno o polimeru). [1]



Slika 2.13. Shema DLP postupka [1]

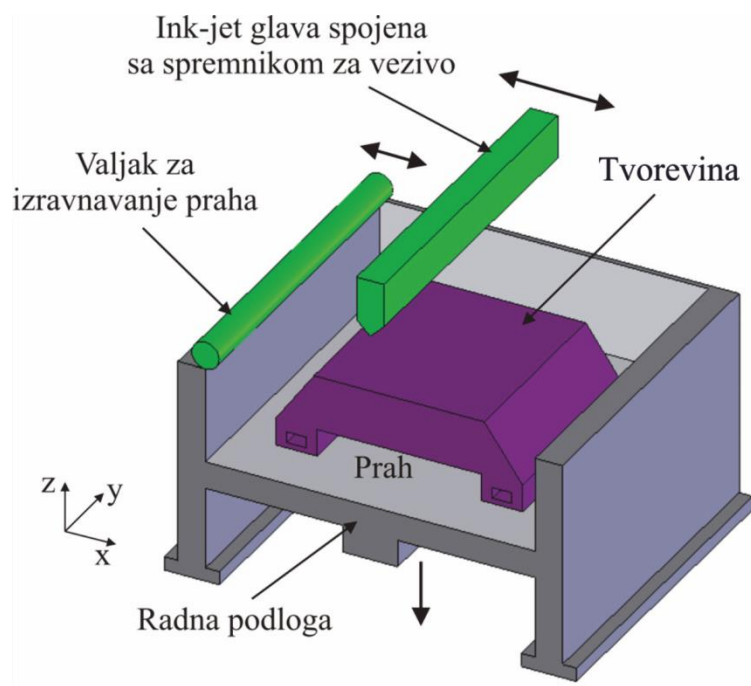
PolyJet postupak radi tako da mreža mlaznica nanosi sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu. Materijal očvršćuje pod djelovanjem UV svjetlosti tvoreći sloj. [1] Postupak je detaljnije opisan u poglavlju 3.

Selektivno lasersko srašćivanje (slika 2.14) jedan je od najvažnijih postupaka izrade tvorevina. Tim je postupkom moguće upotrebljavati gotovo sve vrste materijala koji su preradljivi u praškastom obliku. Postupak je razvijen na University of Texas, Austin i komercijalizirala ga je tvrtka *DTM* 1989. godine u SAD-u. SLS postupak prvenstveno je zamišljen za proizvodnju polimernih tvorevina, ali je proširen i na metalne i keramičke tvorevine. Čitav postupak odvija se u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom, npr. dušikom, da se izbjegne oksidacija površine i potencijalno izgaranje čestica praškastog materijala. Radna podloga smještena je na visini koja je potrebna da se položi sloj praškastog materijala i dobije željena debljina sloja. Praškasti materijal nanosi se iz komore koja sadrži materijal za obradu, s pomoću valjka ili ravne ploče za izravnavanje. Prah u radnoj komori održava se pri temperaturi neposredno ispod tališta T_m (kod kristalastih plastomera, najčešće PA) i/ili staklišta T_g (što je tipično za amorfne plastomere, kao što je PC). Kristalasti i kristalni plastomeri imaju bolja mehanička svojstva od amorfni, pa je primjena kristalnih i kristalastih plastomera ograničena za izradu modela za fino lijevanje oko keramičke ljuske (e. *investment casting*). Sloj praha skenira se i grije toplinskom energijom laserske zrake, te dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. CO₂ laser skenira i oblikuje prah u željenom presjeku. To počinje s donjim presjekom. Radna komora se grije i time se može smanjiti snaga lasera koja je potrebna za izradu neke tvorevine i spriječiti vitoperenje tvorevine tijekom postupka izrade uslijed nehomogene toplinske rastezljivosti i skupljanja. Radna podloga se snizuje do sloja debljine koji dopušta da se položi novi sloj praha. Novi sloj se skenira, prilagođuje slijedećem gornjem presjeku i prijanja prethodnom sloju. To se ponavlja dok i najgornji sloj tvorevine nije proizveden. Naknadno umreživanje može biti potrebno za neke materijale. [1]



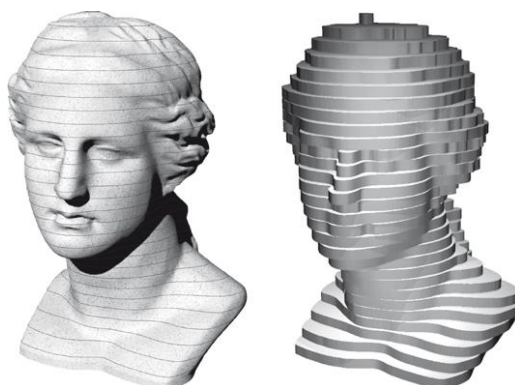
Slika 2.14. Shema SLS postupka [1]

3D tiskanje naziva se tako zbog sličnosti sa inkjet tiskanjem. Postupak je razvijen 1989. godine u SAD-u na MIT sveučilištu. U 3D tiskanju (slika 2.15), umjesto tinte izbacuje se vezivo ili ljepilo. Kako se vezivo i prah nanose u slojevima, tvorevina se izrađuje sloj – po – sloj. Radna podloga smještena je na visini potrebnoj da se sloj praha stavi na podlogu do željene debljine. Obično se nanosi približno 30 % više praha po sloju da se osigura dobra pokrivenost s prahom na radnoj podlozi. Sloj praha selektivno se skenira glavom printera koja oslobađa kapljevito vezivo i uzrokuje da slojevi prijanjaju jedni uz druge. Glava s mlaznicama skenira prah u željeni oblik presjeka. To počinje s donjim poprečnim presjekom. Radna podloga se snizuje do sloja debljine koji dopušta novom sloju praha da se nataloži. Novi sloj se skenira, prilagođuje obliku slijedećeg gornjeg presjeka i prijanja na prethodni sloj. Postupak se ponavlja sve dok se najgornji sloj ne napravi. Vrijeme izrade ovisi o visini tvorevine, približno 25 mm/h do 50 mm/h (tvrtka *Z Corporation*). Nakon izrade tvorevina se ostavlja neko vrijeme u komori s prahom da postigne potrebnu čvrstoću, zatim se vadi van i pomoću zraka odstranjuje višak praha. Naknadni proces temperiranja (10 minuta pri 95 °C) i infiltriranja voska, epoksida ili cijanoakrilata primjenjuje se da bi tvorevina očvrstnula. [1]



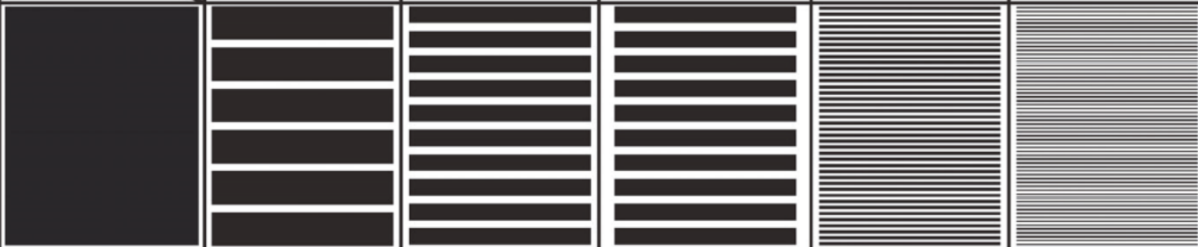
Slika 2.15. Shema 3DP postupka [1]

Svim je postupcima zajedničko da izrađuju željeni proizvod sloj po sloj kao što je prikazano na slici 2.16.



Slika 2.16. Prikaz modela rastavljenog na slojeve [7]

Na slici 2.17 vidimo usporedbu debljina slojeva najpoznatijih aditivnih postupaka. Usporedba je napravljena pomoću pravokutnika koji predstavlja debljinu od 1 mm te je za svaki od navedenih postupaka prikazan broj slojeva koje je potrebno načiniti kako bi njihova zbrojena debljina iznosila 1 mm. Debljina sloja utječe na kvalitetu površine (hrapavost). Tako je kod 3DP proizvoda $R_a \cong 15 \mu m$, PolyJeta $R_a \cong 1,5 \mu m$ i SLS $R_a \cong 10 \mu m$. [1, 13]

| Postupak 1 mm | FDM | 3DP | SLS | SLA | PolyJet |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|  | | | | | |
| Potreban broj slojeva da se postigne 1 mm debljine | 6 slojeva po 0,178 mm | 10 slojeva po 0,1 mm | 10 slojeva po 0,1 mm | 40 slojeva po 0,025 mm | 62 sloja po 0,016 mm |

Slika 2.17. Usporedba debljina slojeva nekih AM postupaka [14]

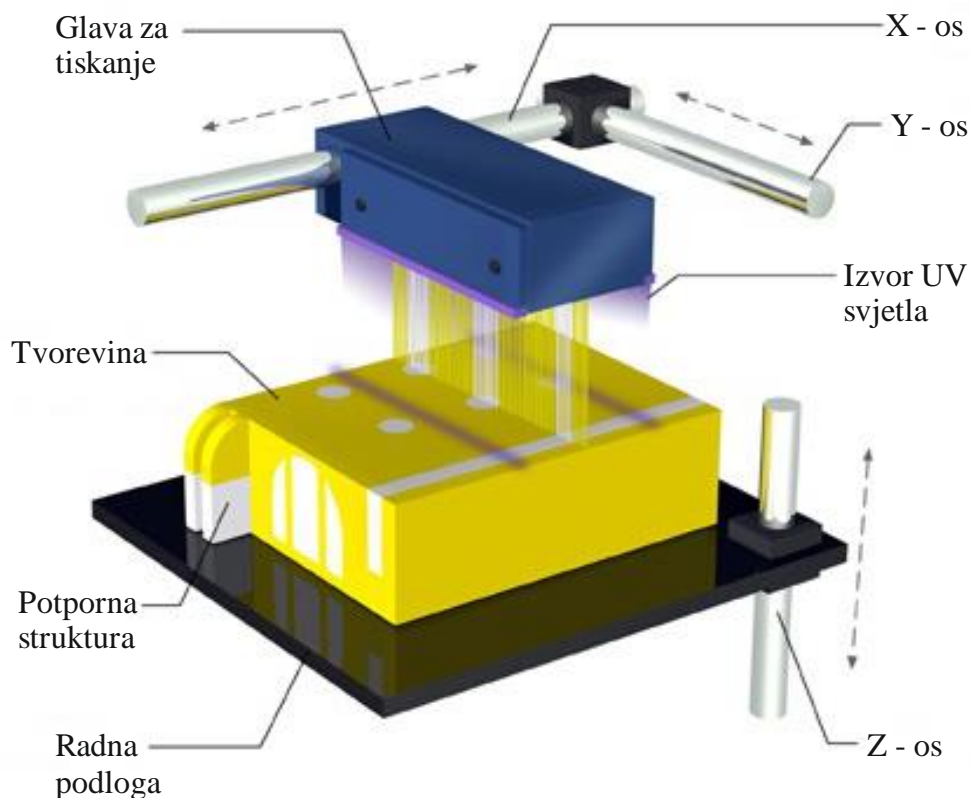
Svaki postupak ima svojih prednosti i nedostataka, a izbor ovisi o vrsti materijala, mehaničkim svojstvima, kvaliteti površine te naravno cijeni završne tvorevine. Na slici 2.18 vidimo primjere proizvoda načinjenih najrasprostranjenijim AM postupcima.



Slika 2.18. Primjeri proizvoda načinjenih AM postupcima [7, 1]

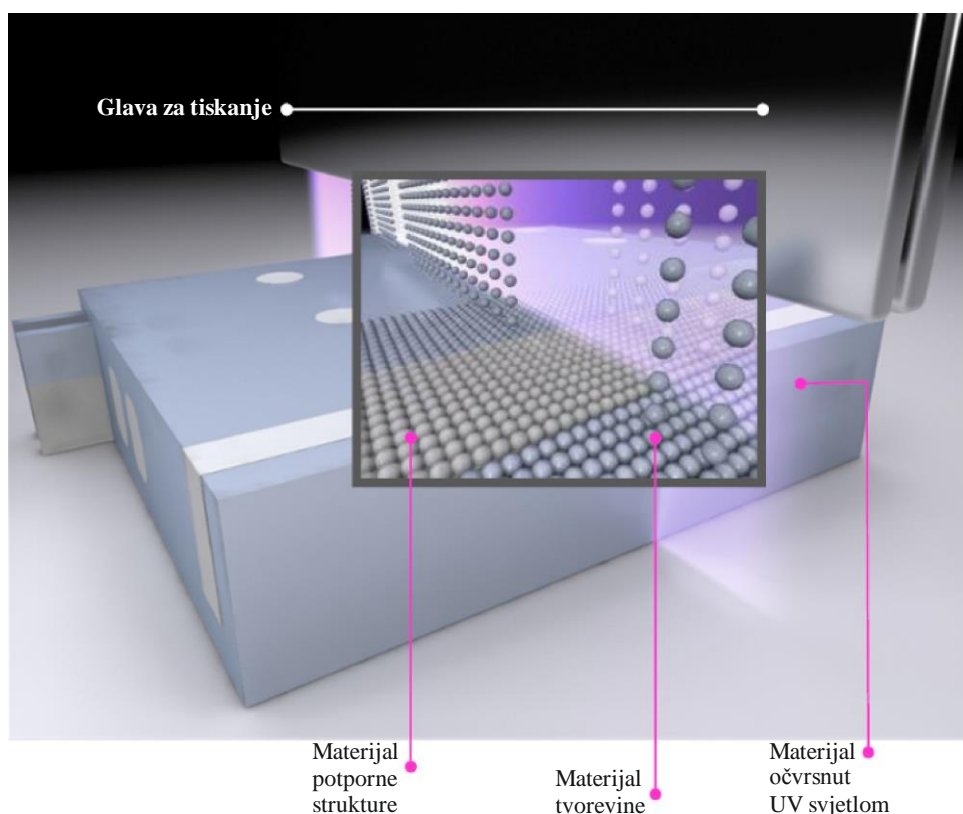
3 PolyJet postupak

Tvrtka *Objet Geometries* razvila je PolyJet (mreža mlaznica) postupak 2000. godine, sjedinjujući dobre strane stereolitografije (SLA) i 3D tiskanja. [1]



Slika 3.1. PolyJet postupak [7]

Na slici 3.1 prikazan je princip rada PolyJet postupka. Mreža mlaznica kliže naprijed – nazad u smjeru y – osi i nanosi/tiska sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu, debljine $16\ \mu\text{m}$, što je otprilike $1/5$ debljine stereolitografskog sloja. Svaki sloj fotoosjetljivog polimera očvršćuje pod djelovanjem UV svjetlosti, odmah nakon tiskanja, tvoreći potpuno umreženu tvorevinu, bez potrebe naknadnog umreživanja. Primjenjuju se dva različita materijala: jedan za model, a drugi kao potporna struktura, tj. pola mreže mlaznica nanosi materijal za model, a druga polovica za potpornu strukturu što je prikazano na slici 3.2. Nakon završenog prvog sloja, radna podloga spušta se po z – osi za debljinu sljedećeg sloja i glava za tiskanje započinje izradu tog sljedećeg sloja. Nakon izrade tvorevine potporna struktura (materijal u obliku gela) se lako uklanja vodom pri tlaku od 40 bara ili ručno, što zavisi od oblika tvorevine. Tankostjene i male tvorevine čiste se s nižim tlakovima, dok robusne s visokim tlakovima čime je skraćeno vrijeme čišćenja. [1]



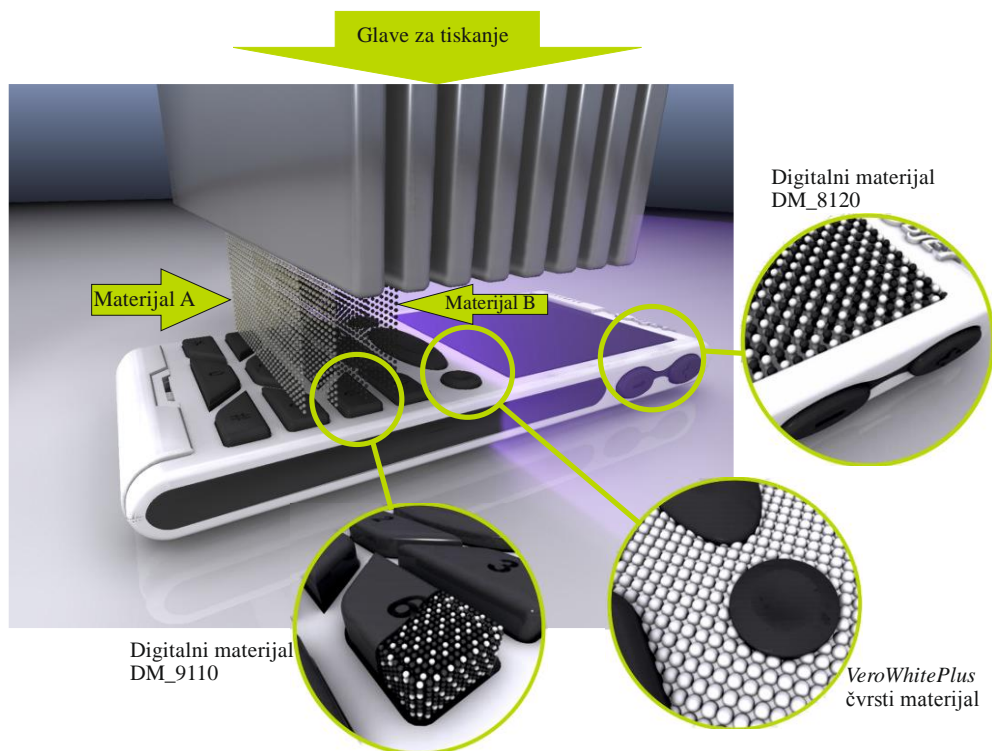
Slika 3.2. Nanošenje materijala PolyJet postupkom [15]

PolyJet postupak izrade dijelova upotrebljava se u *Objet Eden* seriji pisača tvrtke *Stratasys*.

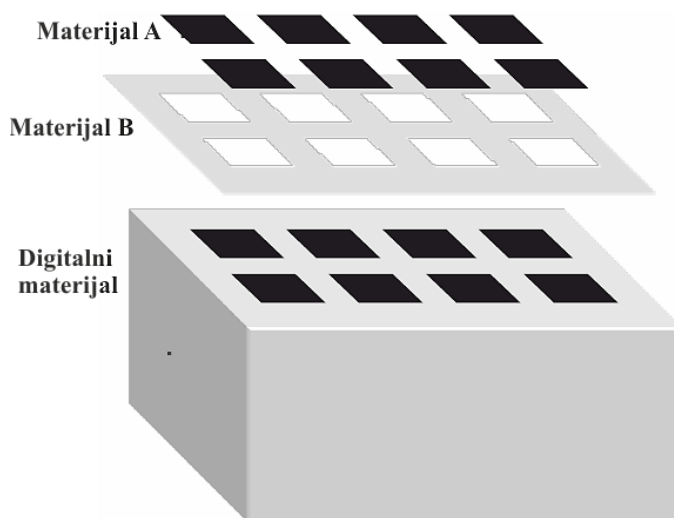
3.1 PolyJet Matrix

PolyJet Matrix je postupak koja predstavlja iskorak u odnosu na originalan PolyJet postupak. To je prvi postupak kod kojeg je omogućeno istovremeno nanošenje različitih vrsta materijala. Tako se dobiva postupak kojim je moguće izrađivati proizvode načinjene od različitih vrsta materijala s različitim mehaničkim i fizikalnim svojstvima i to sve u jednom koraku kao što je prikazano na slici 3.3. Postupak se upotrebljava u *Objet Connex* seriji pisača tvrtke *Stratasys*. Materijali koji se upotrebljavaju su također *brand* tvrtke *Stratasys* i nazivaju se *FullCure* materijali čiji raspon seže od čvrstih do izrazito elastičnih materijala. Mješajući *FullCure* materijale dobivaju se novi digitalni materijali (slika 3.4) koji su zapravo kompoziti i kojima se mogu simulirati svojstva konvencionalnih polimera. Tako npr. kombiniranjem čvrstog *VeroWhitePlus* i elastičnog *TangoBlackPlus* materijala mogu se dobiti digitalni materijali s različitim mehaničkim svojstvima između krutog i elastičnog kao što to vidimo na slici 3.5. Na slici 3.3 je prikazan digitalni materijal *DM_8120* koji je načinjen od materijala *VeroWhite* i *TangoBlack* od kojih je primarni materijal *VeroWhite*, a prikazan je i digitalni materijal *DM_9110* čiji su sastavni dijelovi isti kao kod materijala *DM_8120* s time što je u ovom slučaju primarni materijal *TangoBlack*. [1, 16]

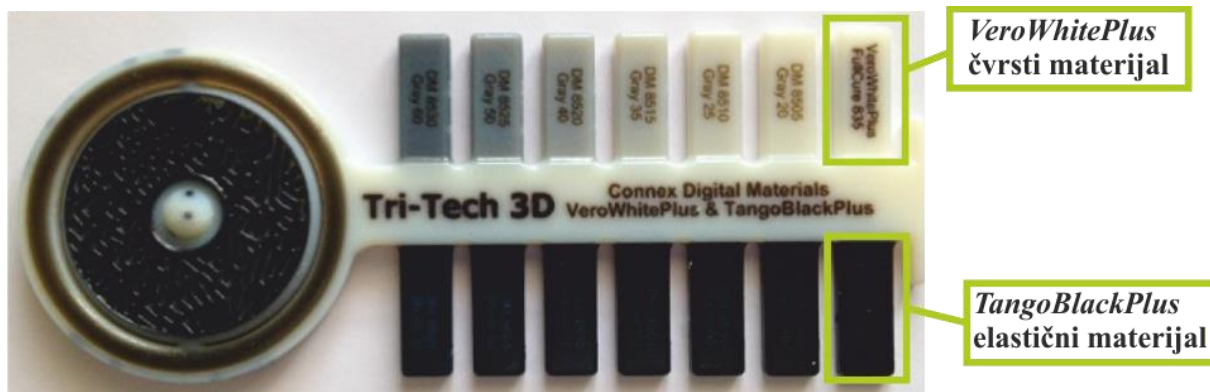
Uređaj za tiskanje ima 8 glava i prilikom tiskanja 2 različita materijala svakome od njih su na raspolaganju po 2 glave dok ostale 4 služe za tiskanje potporne strukture. Sve su glave precizno kontrolirane da bi se dobila savršena sinkronizacija. Sinkronizirano moraju raditi i mlaznice kroz koje dolazi materijal. Na svakoj glavi ima 96 mlaznica promjera $50\text{ }\mu\text{m}$ i precizno su kontrolirane da bi u pravom trenutku mogle nanijeti materijal na podlogu. Zahvaljujući takvoj preciznoj sinkronizaciji svih dijelova stroja, moguće je dobiti digitalni materijal točno željenih svojstava na točno određenom mjestu. [1, 16]



Slika 3.3. PolyJet Matrix postupak [17]



Slika 3.4. Digitalni materijal [17]



Slika 3.5. Raspon digitalnih materijala dobivenih kombinacijom čvrstog *VeroWhitePlus* i elastičnog *TangoBlackPlus* materijala [18]

FullCure materijali su fotopolimerni akrilni materijali koji omogućuju izradu 3D modela visoke preciznosti i finih detalja. Velika različitost smola u FullCure-u, uključuje prozirnost, obojenost, neprozirnost, savitljivost i krutost. Postoje *FullCure 720*, *VeroBlue*, *VeroWhite*, *VeroGray*, *VeroBlack*, *Digital ABS*, *DurusWhite*, *Endur*, *TangoPlus*, *TangoBlackPlus*, *TangoGray*, *TangoBlack*, *Fullcure 630/650*, *VeroDent*, *VeroDentPlus*, *VeroGlaze*, *VeroCyan*, *VeroYellow*, i *VeroMagenta*. [1, 19]

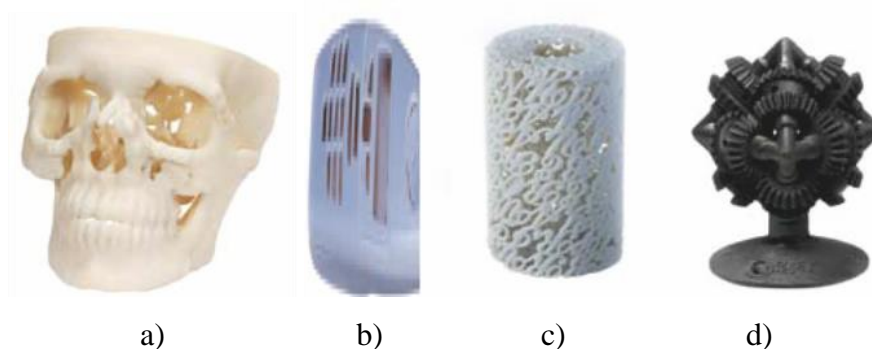
FullCure 720 je proziran akrilni fotopolimer poznat i pod nazivom *PolyJet Amber Clear*, koji je prikladan za krute modele. Prednosti tog materijala su: nije potrebna naknadna obrada, prekidno istezanje je 20 %, dobra savojna žilavost i mogućnost strojne obrade, bušenja i kromiranja (slika 3.6). [1, 19]



Slika 3.6. Proizvod od materijala *FullCure 720* [20]

Vero materijali (slika 3.7) su neprozirni materijali u boji, koji omogućuju izradu finih detalja i smanjuju potrebu za bojanjem. Imaju izvrsnu savojnu žilavost i modul savitljivosti. *VeroBlue* je blijedo plave boje, izrazito je dobar za izradu kompleksnih modela visoke točnosti izrade. *VeroBlack* je materijal s visokim modulom savitljivosti i visokom postojanošću na vlagu, što ga čini pogodnim za mnoge primjene. Neprozirna crna boja omogućava upotrebu u

elektronici. *VeroGray* ima izvrsnu dimenzijsku točnost, nisku apsorpciju vode, visoku savojnu čvrstoću (95 MPa) i modul savijanja. Primjenjuje se u automobilske industriji, za izradu igračaka, u medicini, elektronici, itd. [1, 13, 19]



Slika 3.7. Proizvodi od materijala: a) *VeroWhite*, b) *VeroBlue*,
c) *VeroGray*, d) *VeroBlack* [20]

PolyJet GreenFire je neproziran materijal zelene boje također poznat pod nazivom *Digital ABS (RDG5160-DM)*. Izdržljiv je i pogodan za izradu kalupnih umetaka (slika 3.8). [19]



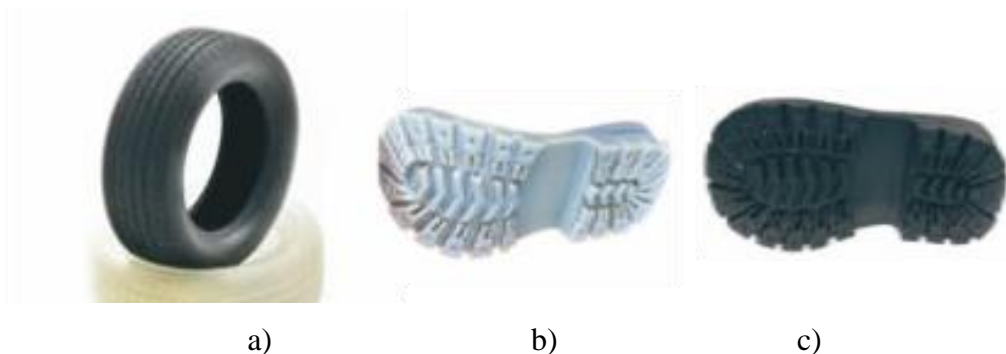
Slika 3.8. Kalupni umetci od materijala *PolyJet GreenFire* [8]

Materijal *DurusWhite* je mliječno bijele boje koji ima svojstva slična polipropilenu i ima dobru savitljivost, čvrstoću i žilavost (slika 3.9). Njegova poboljšana verzija naziva se *Endur* i omogućava izradu modela velike dimenzijske postojanosti i iznimne detaljnosti površina te dobru postojanost pri višim temperaturama. [1, 19]



Slika 3.9. Proizvod od *DurusWhite* materijala [20]

Tango materijali (slika 3.10) imaju izvrsno prekidno istezanje ($> 50\%$), savitljivost i elastičnost. Postoje *TangoBlack*, koji omogućuje elastičnost s tvrdoćom od 61 Shore-a, *TangoGray*, koji je malo tvrdi (75 Shore-a), *TangoPlus* kod kojeg je prekidno istezanje 218 % te *TangoBlackPlus* koji ima elastičnost s tvrdoćom oko 27 Shore-a. [1, 19]



Slika 3.10. Proizvodi od materijala: a) *TangoBlackPlus*, b) *TangoGray*, c) *TangoBlack* [19]

FullCure 630 i *FullCure 650* su materijali koji su dobili medicinski certifikat te se upotrebljavaju za izradu slušnih pomagala (slika 3.11).



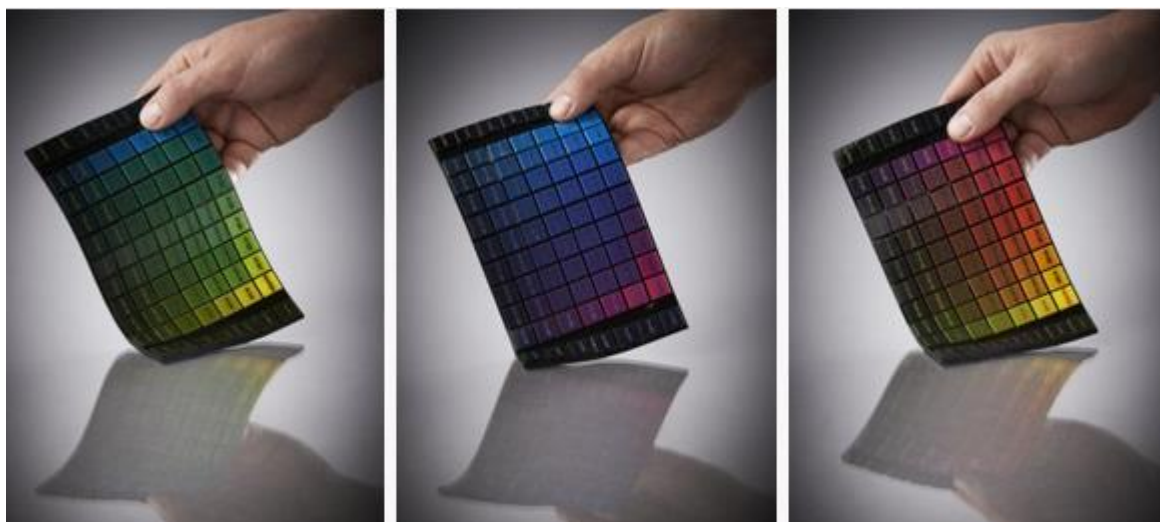
Slika 3.11. Slušna pomagala od materijala *FullCure 650* (lijevo) i *FullCure 630* (desno) [19]

Materijal *VeroDent* se primjenjuje u stomatologiji te ima dobru detaljnost izrade i dobru postojanost i izdržljivost. *VeroDentPlus* ima sva svojstva *VeroDent*-a ali je na svakom području još poboljšana pa nudi izvrsnu detaljnost izrade te izvrsnu izdržljivost. *VeroGlaze* se ističe bojom jako slično boji zubi (A2) i može biti smješten u usta do 24 sata pa se primjenjuje prilikom operacija (slika 3.12). [19]



Slika 3.12. Proizvod od materijala *VeroGlaze* [19]

Upotrebom kombinacija materijala *VeroCyan*, *VeroMagenta* i *VeroYellow* i njihovim kombiniranjem s ostalim *Vero* materijalima mogu se dobiti zanimljive kombinacije boja i mehaničkih svojstava materijala te se tako otvaraju mnoge nove mogućnosti izrade tvorevina. Osim s *Vero* materijalima navedeni materijali se mogu kombinirati i s *TangoBlackPlus* materijalom da bi se dobile fleksibilne obojene tvorevine (slika 3.13). [21]



Slika 3.13. Paleta boja dobivene kombinacijom materijala *VeroCyan*, *VeroMagenta*, *VeroYellow* te fleksibilnog *TangoBlackPlus* materijala [21]

Na slici 3.13 prikazani su držači britvica koji su načinjeni u jednom ciklusu za otprilike 12 sati. Svaki od držača ima drugačiju kombinaciju materijala (uključujući digitalne materijale), i drugačija mehanička svojstva. Služe kao prototipovi za izbor najpogodnije kombinacije materijala za puštanje u proizvodnju. [17]



Slika 3.14. Držači britvica načinjeni različitim kombinacijama materijala [16]

Različitost svojstava vidi se najbolje na slici 3.14 kad se tri britvice od različitih materijala načinjene u jednom ciklusu unutar dva sata probaju savinuti rukama. S lijeva na desno prvi držač je načinjen od digitalog materijala *DM_9110* koji je elastičan s tvrdoćom 80 Shore A, drugi je načinjen od digitalnog materijala *DM_9130* te je manje fleksibilan i ima tvrdoću 95 Shore A dok je zadnji isprobani držač krut jer je načinjen od krutog *VeroWhite* materijala i prevučen prevlakom debljine 1 mm od *TangoBlack* fleksibilnog materijala. [16]



Slika 3.15. Isprobavanje krutosti držača britvica [15]

PolyJet postupak se primjenjuje u automobilske industriji, elektronicu, za proizvodnju igračaka, obuće, potrošačkih dobara i za izradu nakita. [1]

Prednosti *PolyJet* / *PolyJet Matrix* postupaka su: visoka kvaliteta (zbog vrlo tankog sloja tvorevine su vrlo precizne i imaju jako glatku završnu površinu), mogućnost izrade sitnih detalja i tankih stijenki, primjena u uredima (nema dodira sa smolom i potporna struktura se uklanja s vodom), postupak je brz, nije potrebno naknadno umreživanje i moguće je upotrebljavati različite *FullCure* materijale koji omogućuju različitu geometriju, mehanička svojstva i boju. [1]

PolyJet Matrix postupak provodi se na *Objet Connex* liniji strojeva tvrtke *Stratasys*. Postoje tri modela navedenog uređaja koji se međusobno razlikuju po veličini modela kojeg je na njima moguće izraditi. To su *Objet260 Connex* (radna komora dimenzija 255 x 252 x 200 mm), *Objet350 Connex* (342 x 342 x 200 mm) i *Objet500 Connex* (490 x 390 x 200 mm). Na njima se mogu upotrebljavati svi ranije navedeni materijali. Rezolucija tiskanja je 600 dpi po X i Y osi te 1600 dpi po Z osi. [19]

Postoje tri moda tiskanja [16]:

- Mod tiskanja digitalnih materijala – tiskanje se provodi brzinom od 12 mm/h u slojevima debljine 30 μm , a dobiva se mogućnost tiskanja različitih materijala uključujući digitalne materijale
- Mod tiskanja s visokom kvalitetom tiska – tiskanje se provodi brzinom od 12 mm/h u slojevima debljine 16 μm
- Mod tiskanja s visokom brzinom izrade – tiskanje se provodi brzinom od 20 mm/h u slojevima debljine 30 μm

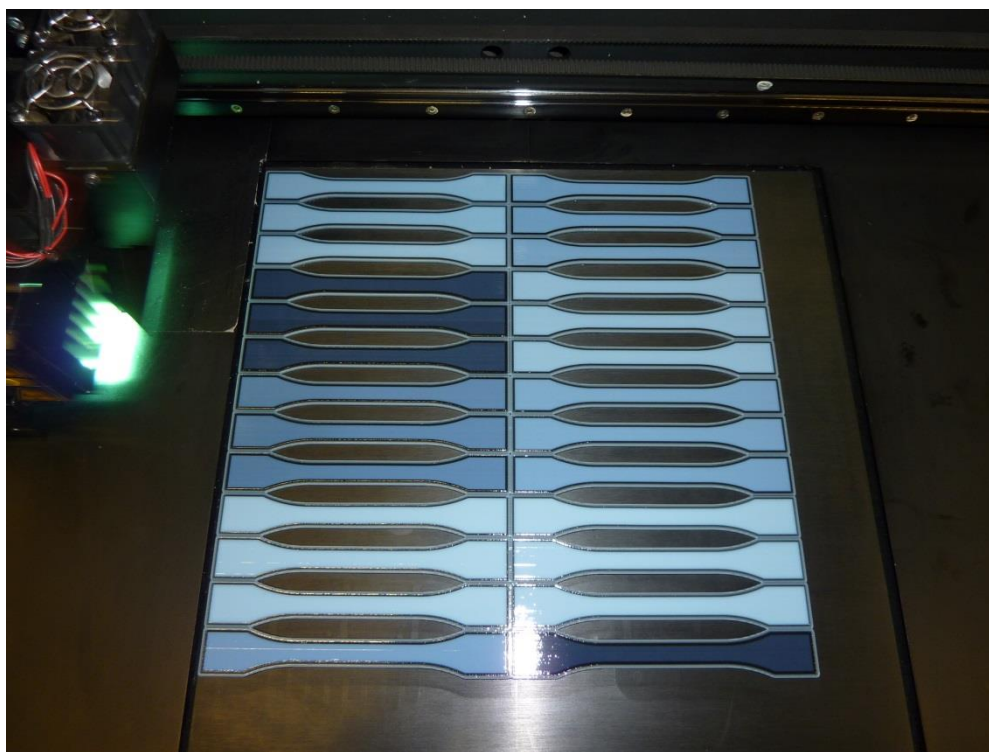
Na slici 3.15 vidimo uređaj *Objet350 Connex*, model koji je nabavljen i za potrebe *Centra za aditivne tehnologije* smještenog na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu.



Slika 3.16. *Objet350 Connex* uređaj za postupak *PolyJet Matrix* [22]

4 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada želio se je ispitati utjecaj parametara izrade na mehanička svojstva. Za potrebe tog ispitivanja postupkom *PolyJet Matrix* su načinjena ispitna tijela čija je jezgra za svako tijelo bila od materijala *VeroWhite* dok su materijali za prevlaku bili tzv. digitalni materijali. Oni predstavljaju mješavinu materijala *TangoBlackPlus* i *VeroWhite* uz prevladavanje *TangoBlackPlus*-a da bi se dobio elastičan materijal s tvrdoćama 40, 50, 60, 70 odnosno 80 Shore A i one predstavljaju prvi ulazni parametar eksperimenta označen slovom *A*. Drugi ulazni parametar koji se uzima u obzir u ovom eksperimentu je debljina prevlake koja je u granicama između 0,4 mm i 1,2 mm te je označena slovom *B*. Vrijednosti parametara uzete su iskustveno. Vrijednost debljine prevlake veća od 1,2 mm nema smisla jer se tada gubi smisao čvrste jezgre dok debljina prevlake manja od 0,4 mm neće imati preveliki utjecaj na mehanička svojstva pa se iz tog razloga prevlaka izrađivala u granicama između tih vrijednosti. Tvrdoća prevlake manja od 40 Shore A je previše rastezljiva te bi ona klizila iz čeljusti kidalice i ne bi bilo moguće ispitati željena mehanička svojstva. Na slici 4.1 prikazana je izrada ispitnih tijela na kojima se vidi različitost debljina jezgri i materijala prevlake.



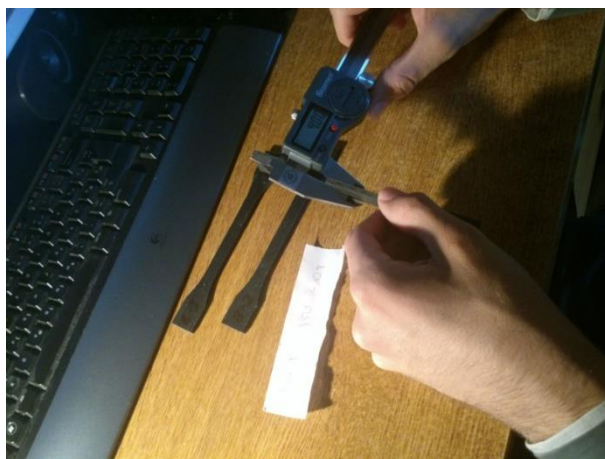
Slika 4.1. Izrada ispitnih tijela

Parametri koji su upotrebljeni tijekom izrade ispitnih tijela generirani su s pomoću programskog paketa *DesignExpert*, metode odzivnih površina (e. *response surface*), korisnički definiran (e. *user defined*) plan pokusa.

Odvajanje potporne strukture s ispitnih tijela nakon izrade vrši se ručno kao što je to prikazano na slici 4.2. Nakon odvajanja potporne strukture i sušenja izmjerene su dimenzije (slika 4.3), tvrdoća (slika 4.4) te su tijela podvrgnuta rasteznom ispitivanju.



Slika 4.2. Ispiranje (odvajanje) potpornog materijala



Slika 4.3. Mjerenje dimenzija ispitnog tijela



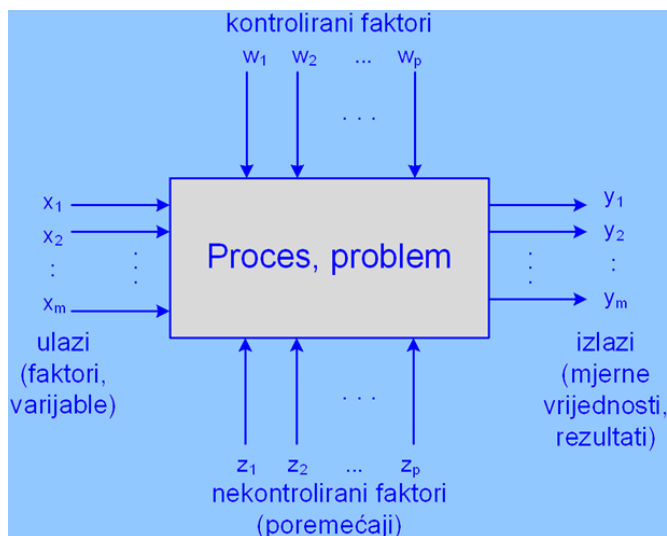
Slika 4.4. Mjerenje tvrdoće ispitnog tijela

4.1 Plan pokusa

Generirani plan pokusa po kojem su rađena ispitna tijela pripada u skupinu planova pokusa višeg reda, tzv. metode odzivne površine. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa (slika 4.5). Svrha plana pokusa je generiranje matematičkog modela, odnosno jednadžbe koja opisuje proces. [23]

Faze izvođenja pokusa [23]:

1. Definirati problem i cilj istraživanja
2. Odabrati utjecajne faktore i njihove razine
3. Odabrati mjerene vrijednosti i izlazne varijable
4. Odabrati model pokusa
5. Izvesti pokus (predpokus, glavni pokus)
6. Analizirati rezultate
7. Formulirati zaključke i prijedloge



Slika 4.5. Opći model plana pokusa [23]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednak nuli. Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α (udaljenosti stanja pokusa u osima od centra pokusa). [1]

Pokus je rotabilan ukoliko je [1]:

$$\alpha = \sqrt[4]{F} \quad (4.1)$$

gdje je F – broj faktorskih stanja ($F=2^k$).

U slučaju dva faktora $\alpha = 2^{\frac{2}{4}} = 2^{\frac{1}{2}} = 1,414$.

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti pogrešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena pogreške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena pogreška pokusa predstavlja čistu pogrešku (e. *pure error*), odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [1]

Jednadžba (polinom II. stupnja) kojim se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi (slučaj k faktora pokusa) [1]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (4.2)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti. [1]

Obrada podataka vršila se modulom ANOVA (analiza varijance). Analiza varijance je postupak usporedbe više uzoraka pri čemu svaki uzorak predstavlja osnovni skup (populaciju). U tehničkim i proizvodnim uvjetima analiza varijance predstavlja postupak provjere djelovanja promjene stanja nekog faktora na mjerenu vrijednost – rezultat. Analizom varijance provjeravaju se promjene aritmetičkih sredina uzoraka. [23]

U *DesignExpertu* generirano je 20 stanja pokusa. Tablica 4.1 prikazuje parametre koji su izmjenjivani kod izrade ispitnih tijela, a na kojima su kasnije provedena potrebna mjerenja i ispitivanja. [23]

Tablica 4.1. Parametri izrade ispitnih tijela

| Ispitni uzorak | Debljina prevlake, mm | Tvrdoća prevlake, Shore A |
|----------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 | 1 | 70 |
| 2 | 0,6 | 50 |
| 3 | 1,2 | 60 |
| 4 | 1,2 | 80 |
| 5 | 0,4 | 40 |
| 6 | 0,8 | 80 |
| 7 | 0,8 | 60 |
| 8 | 0,8 | 50 |
| 9 | 0,6 | 70 |
| 10 | 1,2 | 40 |
| 11 | 1 | 50 |
| 12 | 0,4 | 60 |
| 13 | 0,8 | 40 |
| 14 | 0,6 | 60 |
| 15 | 0,8 | 60 |
| 16 | 0,4 | 80 |
| 17 | 0,8 | 70 |
| 18 | 0,8 | 60 |
| 19 | 1 | 60 |
| 20 | 0,8 | 60 |

4.2 Materijali za izradu ispitnih tijela

PolyJet Matrix omogućava istovremeno tiskanje različitih materijala te je na toj karakteristici temeljen eksperimentalni dio ovog rada.

Za izradu jezgri upotrijebljen je materijal *VeroWhite* čija su svojstva navedena u tablici 4.2. Za prevlaku su upotrijebljeni digitalni materijali dobiveni različitim kombinacijama materijala *TangoBlackPlus* i *VeroWhite* pri čemu prevladava *TangoBlackPlus* sa svojim svojstvima koja su slična svojstvima gume, a koja su navedena u tablici 4.3.

Tablica 4.2. Mehanička svojstva materijala *VeroWhite* [24]

| MEHANIČKA SVOJSTVA | IZNOS | JEDINICA |
|---------------------------|-----------|----------|
| Rastezna čvrstoća | 50-65 | MPa |
| Prekidno istezanje | | % |
| Modul elastičnosti | 2000-3000 | MPa |
| Savojna čvrstoća | 75-110 | MPa |
| Modul savitljivosti | 2200-3200 | MPa |
| Tvrdoća - Shore D | 83-86 | - |
| Tvrdoća - Rockwell M | 73-76 | - |
| Zarezna žilavost po Izodu | 40-50 | J/m |
| Apsorpcija vode | 1,5-1,9 | % |

Tablica 4.3. Mehanička svojstva materijala *TangoBlackPlus* [24]

| MEHANIČKA SVOJSTVA | IZNOS | JEDINICA |
|---------------------------|---------|----------|
| Rastezna čvrstoća | 0,8-1,5 | MPa |
| Prekidno istezanje | 170-220 | % |
| Trajna tlačna deformacija | 4-5 | % |
| Tvrdoća - Shore A | 26-28 | - |
| Otpornost na trganje | 2-4 | Kg/cm |

4.3 Uređaj za izradu ispitnih tijela PolyJet Matrix postupkom

Za izradu ispitnih tijela primijenjen je uređaj *Connex 350* izraelskog proizvođača *Objet* koji je od 2012. godine u vlasništvu tvrtke *Stratasys* iz Sjedinjenih Američkih Država. To je uređaj koji omogućuje istovremeno tiskanje više različitih vrsta materijala uklanjajući na taj način potrebu za naknadnim spajanjem pojedinih dijelova.

Karakteristike uređaja *Objet Connex 350* [25]:

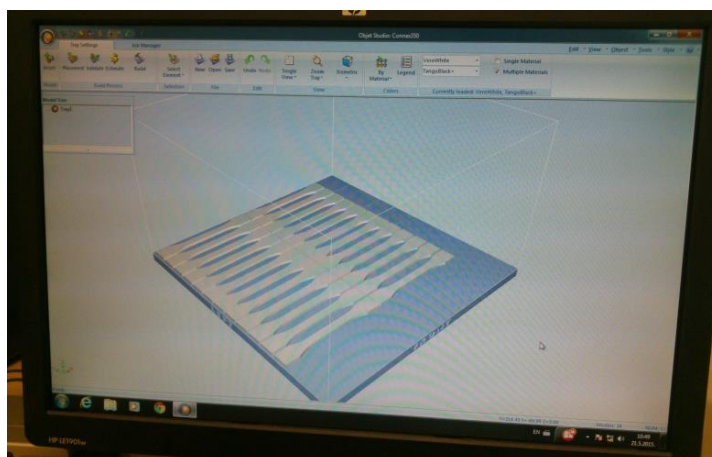
- Najmanja debljina slojeva: 16 μm
- Dimenzije radne površine: 350 x 350 x 200 mm
- Neto površina tiskanja: 342 x 342 x 200 mm
- Rezolucija tiskanja:
 - o X – os: 600 dpi
 - o Y – os: 600 dpi
 - o Z – os: 1600 dpi
- Broj glava za tiskanje: 8
- Načini tiskanja:

- *Digital Material* (DM) – najmanja debljina slojeva 30 μm
- *High Quality* (HQ) – najmanja debljina slojeva 16 μm
- *High Speed* (HS) – najmanja debljina slojeva 30 μm
- Podržava sve materijale opisane u poglavlju 3.1
- Dimenzije uređaja (širina x duljina/dubina x visina): 1420 x 1120 x 1130 mm
- Masa uređaja: 500 kg
- Uvjeti rada uređaja:
 - Temperatura prostorije: 18 – 22 °C
 - Relativna vlažnost zraka u prostoriji: 30 – 70 %

Uređaj je prikazan na slici 4.6, dok je na slici 4.7 prikazan software *Objet Studio* koji se primjenjuje za raspoređivanje izradaka po radnoj površini, određivanje njihove orijentacije, izabiranje materijala za pojedine dijelove odnosno prevlake izradaka, određivanje debljine prevlaka, kvalitete tiska i mnogih drugih parametara postupka izrade.



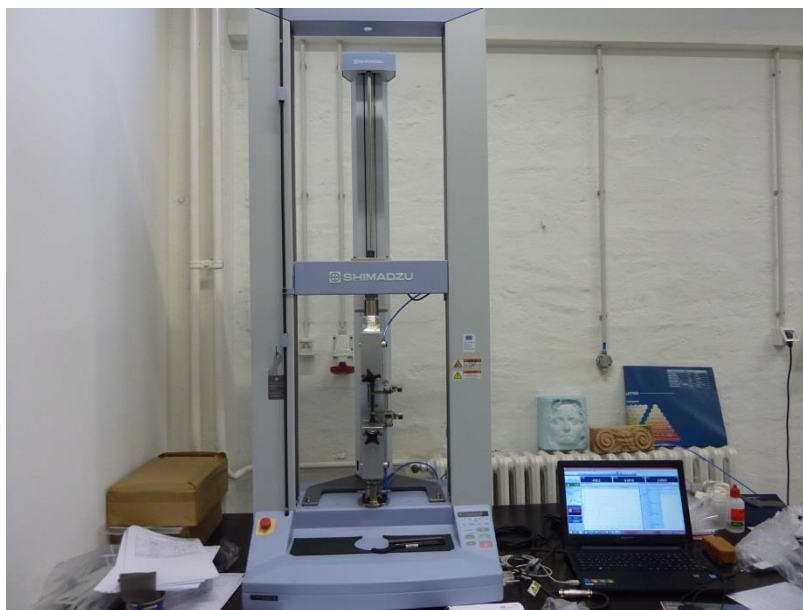
Slika 4.6. *Objet Connex 350* u Centru za aditivne tehnologije



Slika 4.7. Ispitna tijela raspoređena po radnoj površini u programu *Objet Studio*

4.4 Uredaj za određivanje rasteznih svojstava

Za određivanje rasteznih svojstava primjenjuje se kidalica *Shimadzu AGS – 10kNX* (slika 4.8) s ekstenzometrom i maksimalnom silom opterećenja od 10 kN.



Slika 4.8. Kidalica *Shimadzu AGS – 10kNX*

Ispitivanja su provedena pri sobnoj temperaturi od 22 °C.

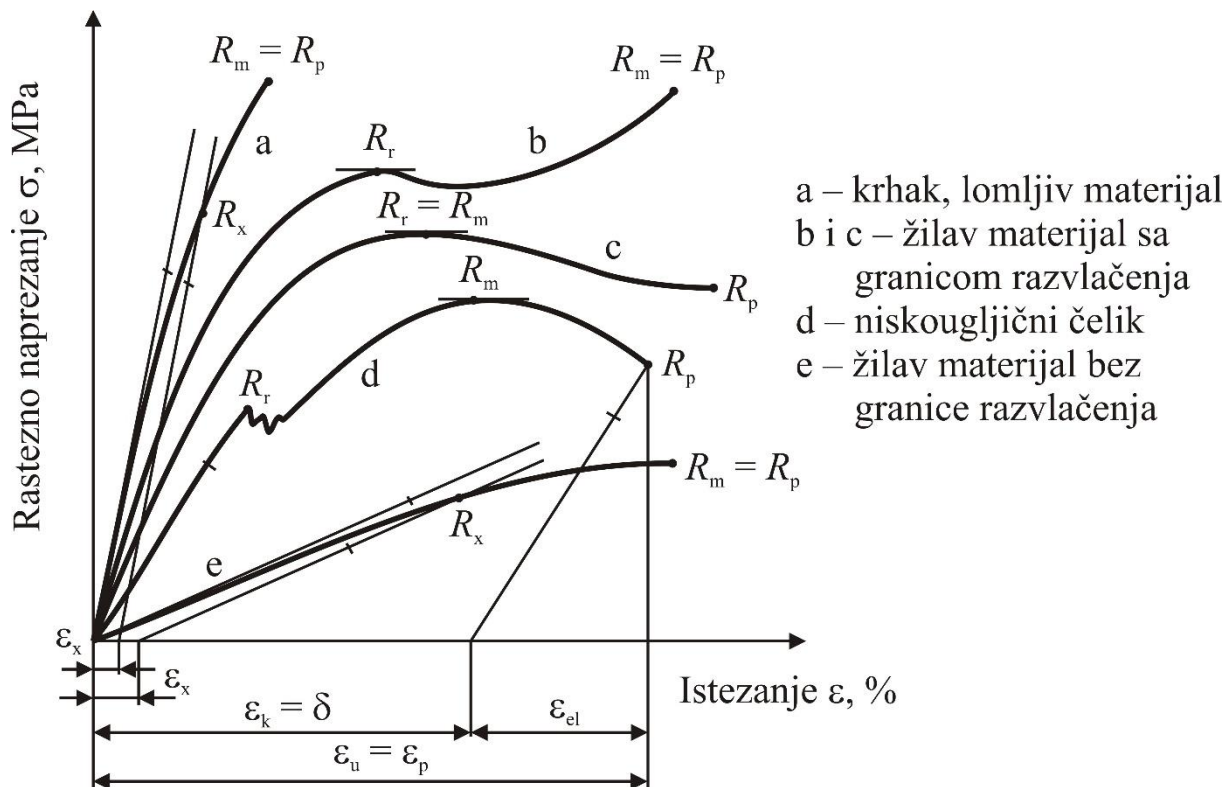
Za određivanje rasteznih svojstava ispitno tijelo se stegne u pneumatske čeljusti kidalice (slika 4.9) i rasteže se silom F , pri brzini $v = 5 \text{ mm/min}$. Kidalica je povezana s računalom u kojem se pomoću programa *Trapezium X* prikupljaju podaci dobiveni ispitivanjem.



Slika 4.9. Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava

4.4.1 Ispitivanje rastezne čvrstoće

Prema normi HRN EN ISO 527 – 2: 2012 određuju se rastezna svojstva plastomera te je korištena i za potrebe ovog eksperimenta. Normom su definirane sljedeće veličine (slika 4.11) [25]:



Slika 4.10. Tipične krivulje rasteznog naprezanja – istezanja [1]

- *mjerna duljina* L_0 [mm] – je početna udaljenost između umjerne crte na središnjem dijelu ispitnog tijela
- *brzina ispitivanja* v [mm/min] – je brzina odvijanja zahvata na kidalici tijekom ispitivanja
- *rastežno naprezanje* R [MPa] – je rastezna sila po jedinici površine na presjeku unutar mjerne duljine, provedena na ispitnom tijelu u bilo kojem trenutku
- *granica razvlačenja* R_r [MPa] – je naprezanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konvencionalna granica razvlačenja* R_x [MPa] - je naprezanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istezanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuju granicu razvlačenja. Dogovorena vrijednost trajnog istezanja kod polimera je 0,1 ili 1 %
- *rastezna čvrstoća* R_m [MPa] – je naprezanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela

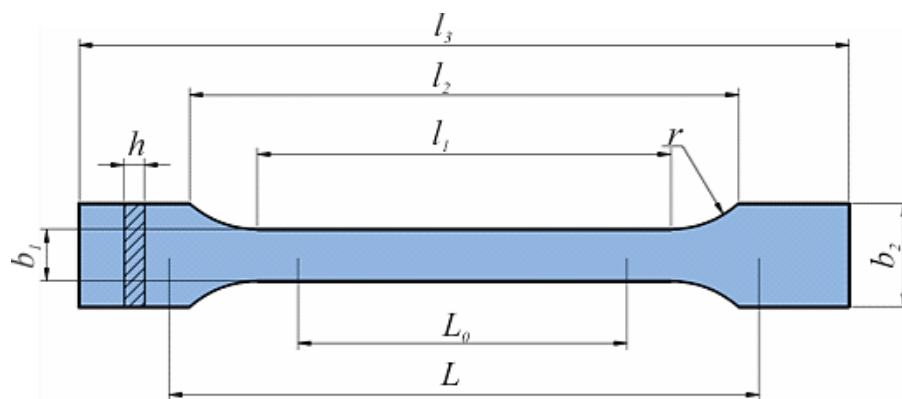
- *prekidna čvrstoća* R_p [MPa] – je naprezanje što ga izaziva prekidna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konačno istezanje, istegnuće* ε_K [%] – je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine ispitnog tijela
- *prekidno istezanje* $\varepsilon_p = \varepsilon_u$ [%] – je omjer prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete
- *modul elastičnosti* E [MPa] – modul rastezljivosti je omjer naprezanja $R_2 - R_1$ s odgovarajućim istezanjem $\varepsilon_2 = 0,0025 - \varepsilon_1 = 0,0005$

4.4.2 Oblik ispitnog tijela

Postoje dva osnovna tipa ispitnih tijela (tablica 4.4) [23]:

1A – za višenamjensko ispitivanje

1B – za strojna ispitna tijela, korišteno u ovom ispitivanju (slika 4.12)



Slika 4.11. Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja [26]

Tablica 4.4. Dimenzije rasteznih ispitnih tijela [26]

| Tip ispitnog tijela | Dimenzije [mm] | |
|---|-----------------|---------------|
| | 1A | 1B |
| l_3 – ukupna duljina ^a | 170 | ≥ 150 |
| l_1 – duljina uskog paralelnog dijela | 80 ± 2 | $60 \pm 0,5$ |
| r – polumjer | 24 ± 1 | $60 \pm 0,5$ |
| l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela ^b | $109,3 \pm 3,2$ | $108 \pm 1,6$ |
| b_2 – širina pri kraju | $20 \pm 0,2$ | |
| b_1 – širina uskog dijela | $10 \pm 0,2$ | |
| h – debljina | $4 \pm 0,2$ | |
| L_0 – mjerna duljina | $75 \pm 0,5$ | $50 \pm 0,5$ |
| L – početna udaljenost između čeljusti uređaja | 115 ± 1 | 115 ± 1 |
| ^a Za neke materijale duljina se mora povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) da se izbjegne lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice. ^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{\frac{1}{2}}$, u zavisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije. | | |

4.5 Određivanje tvrdoće s pomoću tvrdomjera

Određivanje utisne tvrdoće s pomoću tvrdomjera (tvrdoća prema Shoreu) vrši se na temelju norme HRN EN ISO 868:2008. [27]

Tvrdoća se određuje tako da se specijalna igla utiskuje u ispitno tijelo (slika 4.10) u definiranim uvjetima prema normi i mjeri se dubina prodiranja igle u tijelo. [1]



Slika 4.12. Mjerenje tvrdoće ispitnog tijela

Ispitivanje tvrdoće nije razorna metoda, pa je mjerenje moguće na ispitnim tijelima napravljenim za ispitivanje rasteznih svojstava. Najmanja debljina ispitnog tijela mora biti $h = 4 \text{ mm}$. Durometar je potrebno postaviti okomito na podlogu koja se ispituje i držati ga utisnuto $15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ prije očitavanja. Na jednom ispitnom tijelu potrebno ja napraviti 5 mjerenja na različitim pozicijama i odrediti srednju vrijednost. [27]

Zbog malih odstupanja rezultata napravljena su po 3 mjerenja na svakom izratku i određena je njihova srednja vrijednost. Rezultati su dani u prilogu u tablici 8.7.

4.6 Provjera dimenzijske točnosti ispitnih tijela

Nakon što su ispitna tijela izrađena i očišćena, provjerena je njihova dimenzijska točnost. Izmjerene su normirane vrijednosti veličina prema slici 4.12: b_1 , b_2 , h i l te je izračunata površina poprečnog presjeka mjernog područja prema formuli $A = b_1 \cdot h$. Mjerenja su izvršena pomoću digitalnog pomičnog mjerila proizvođača *Starrett* (slika 4.3). U tablici 4.5 su prikazane srednje vrijednosti i standardna odstupanja za svako stanje pokusa. Rezultati mjerenja dani su u prilogu u tablici 8.2.

Tablica 4.5. Dimenzije ispitnih tijela

| Stanje pokusa | | b_1 , mm | h , mm | $A = b_1 \cdot h$, mm ² | b_2 , mm | l , mm |
|---------------|-----------|---------------|-------------|--|---------------|-------------|
| 1 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,94 | 20,00 | 150,15 |
| | S | 0,0153 | 0,0058 | 0,0200 | 0,0058 | 0,0100 |
| 2 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 19,99 | 150,17 |
| | S | 0,0265 | 0,0000 | 0,1058 | 0,0000 | 0,0058 |
| 3 | \bar{x} | 10,00 | 3,99 | 39,93 | 20,01 | 150,16 |
| | S | 0,0100 | 0,0058 | 0,0702 | 0,0058 | 0,0321 |
| 4 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,87 | 20,01 | 150,17 |
| | S | 0,0115 | 0,0058 | 0,0115 | 0,0153 | 0,0058 |
| 5 | \bar{x} | 9,94 | 4,01 | 39,87 | 19,98 | 150,07 |
| | S | 0,0115 | 0,0000 | 0,0463 | 0,0289 | 0,0321 |
| 6 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,89 | 20,01 | 150,13 |
| | S | 0,0252 | 0,0000 | 0,1007 | 0,0100 | 0,0289 |
| 7 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,88 | 19,98 | 150,06 |
| | S | 0,0200 | 0,0000 | 0,0800 | 0,0058 | 0,0404 |
| 8 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 19,99 | 150,13 |
| | S | 0,0100 | 0,0000 | 0,0400 | 0,0100 | 0,0153 |
| 9 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,87 | 20,01 | 150,15 |
| | S | 0,0289 | 0,0000 | 0,1155 | 0,0173 | 0,0058 |
| 10 | \bar{x} | 9,98 | 3,99 | 39,87 | 20,00 | 150,16 |
| | S | 0,0153 | 0,0058 | 0,0755 | 0,0058 | 0,0200 |

Tablica 4.5. Dimenzije ispitnih tijela - nastavak

| Stanje pokusa | | b_1 , mm | h , mm | $A = b_1 \cdot h$, mm ² | b_2 , mm | l , mm |
|---------------|-----------|---------------|-------------|--|---------------|-------------|
| 11 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,93 | 20,01 | 150,17 |
| | S | 0,0153 | 0,0000 | 0,0611 | 0,0153 | 0,0100 |
| 12 | \bar{x} | 9,97 | 4,01 | 39,93 | 19,99 | 150,16 |
| | S | 0,0058 | 0,0058 | 0,0502 | 0,0153 | 0,0173 |
| 13 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,93 | 19,99 | 150,17 |
| | S | 0,0058 | 0,0058 | 0,0502 | 0,0115 | 0,0208 |
| 14 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,89 | 20,00 | 150,16 |
| | S | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0000 | 0,0200 |
| 15 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,93 | 20,00 | 150,18 |
| | S | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0058 | 0,0153 |
| 16 | \bar{x} | 9,96 | 4,01 | 39,95 | 20,01 | 150,19 |
| | S | 0,0058 | 0,0000 | 0,0232 | 0,0100 | 0,0058 |
| 17 | \bar{x} | 9,97 | 4,00 | 39,86 | 19,98 | 150,13 |
| | S | 0,0058 | 0,0058 | 0,0345 | 0,0058 | 0,0379 |
| 18 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,91 | 20,00 | 150,17 |
| | S | 0,0208 | 0,0100 | 0,0303 | 0,0000 | 0,0265 |
| 19 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,91 | 19,99 | 150,16 |
| | S | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0000 | 0,0173 |
| 20 | \bar{x} | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 20,00 | 150,17 |
| | S | 0,0100 | 0,0000 | 0,0400 | 0,0058 | 0,0100 |

Iz dobivenih podataka o izmjerenim veličinama ustanovljeno je da dimenzije izrađenih ispitnih tijela ne odstupaju značajno od zadanih dimenzija.

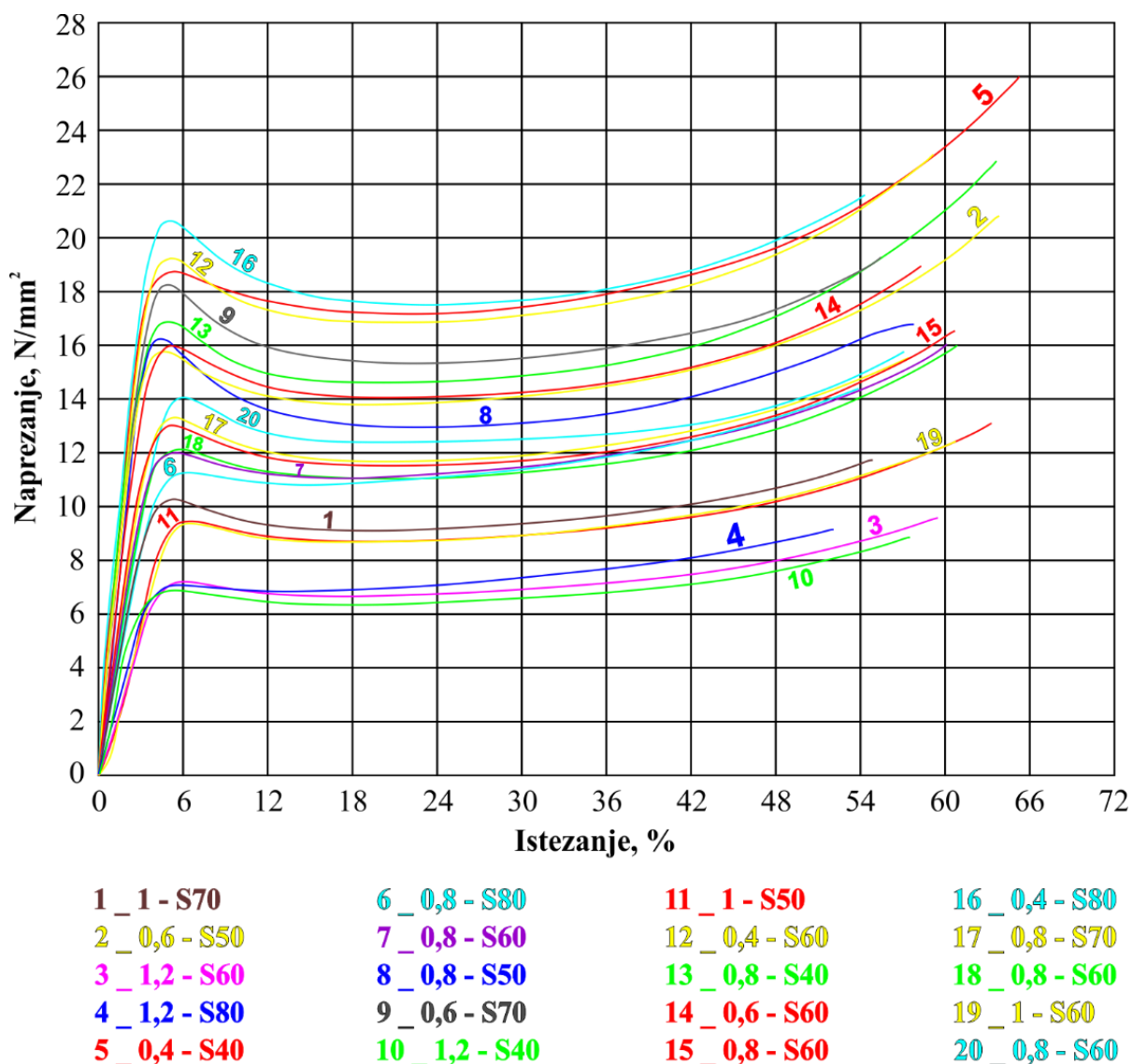
4.7 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

U tablici 4.6 navedeno je 20 stanja pokusa s navedenim stvarnim vrijednostima ulaznih faktora koji su: faktor A – debljina prevlake i faktor B – tvrdoća prevlake, te srednjim vrijednostima mehaničkih svojstava: granica razvlačenja, prekidna čvrstoća, prekidno istezanje, modul elastičnosti i tvrdoća. U prilogu se nalazi tablica 8.1 s kodiranim vrijednostima faktora A i B.

Pokus pod rednim brojem 13 isključen je iz daljnje analize jer je analiza pokazala da odziv u toj točki ne odgovara modelu.

Tablica 4.6. Rezultati mjerenja sa stvarnim vrijednostima faktora A i B

| Stanje pokusa | Faktor A: Debljina prevlake [mm] | Faktor B: Tvrdoća prevlake, Shore A | Granica razvlačenja, R_r [MPa] | Prekidna čvrstoća, R_p [MPa] | Prekidno istezanje, ε_p [%] | Modul elastičnosti, E [MPa] | Tvrdoća, Shore A |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|------------------|
| 1 | 1 | 70 | 11,2 | 12,5 | 56,1 | 115,7 | 78,2 |
| 2 | 0,6 | 50 | 16,6 | 22,1 | 63,7 | 389,8 | 80,6 |
| 3 | 1,2 | 60 | 7,1 | 9,6 | 60,4 | 51,8 | 71,4 |
| 4 | 1,2 | 80 | 7,2 | 9,2 | 52,4 | 31,5 | 76,9 |
| 5 | 0,4 | 40 | 16,4 | 25,7 | 66,0 | 441,7 | 86,3 |
| 6 | 0,8 | 80 | 13,1 | 15,1 | 54,0 | 282,8 | 82,4 |
| 7 | 0,8 | 60 | 12,1 | 15,9 | 59,7 | 407,9 | 79,1 |
| 8 | 0,8 | 50 | 15,5 | 17,9 | 60,9 | 333,5 | 76,2 |
| 9 | 0,6 | 70 | 17,0 | 19,2 | 57,0 | 445,5 | 84,4 |
| 10 | 1,2 | 40 | 7,2 | 8,9 | 56,9 | 23,2 | 65,3 |
| 11 | 1 | 50 | 10,1 | 13,4 | 62,9 | 68,4 | 73,4 |
| 12 | 0,4 | 60 | 19,2 | 23,2 | 60,0 | 517,8 | 88,5 |
| 13 | 0,8 | 40 | 15,8 | 20,8 | 63,8 | 270,4 | 74,1 |
| 14 | 0,6 | 60 | 15,6 | 19,1 | 59,0 | 352,6 | 81,6 |
| 15 | 0,8 | 60 | 12,7 | 15,7 | 58,5 | 236,3 | 78,6 |
| 16 | 0,4 | 80 | 19,7 | 21,4 | 55,6 | 643,4 | 90,8 |
| 17 | 0,8 | 70 | 12,8 | 15,4 | 55,1 | 305,9 | 81,1 |
| 18 | 0,8 | 60 | 12,6 | 16,1 | 60,3 | 230,5 | 79,0 |
| 19 | 1 | 60,00 | 9,90 | 12,70 | 60,00 | 114,90 | 75,90 |
| 20 | 0,8 | 60,00 | 13,10 | 15,60 | 57,90 | 299,50 | 79,30 |



Slika 4.13. Dijagram rasteznog naprezanja - istezanja za provedeni eksperiment

Na slici 4.13 prikazan je dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za svako od 20 stanja pokusa. Iz tog se dijagrama jako dobro vidi utjecaj debljine prevlake na granicu razvlačenja. Naime, stanje pokusa 10 gdje je debljina prevlake 1,2 mm pokazuje najnižu vrijednost granice razvlačenja dok stanje pokusa 16 s debljinom prevlake od 0,4 mm daje najvišu vrijednost granice razvlačenja. Krivulje koje se nalaze između njih pokazuju kako se granica razvlačenja snižava s povećanjem debljine prevlake. Također je vidljivo kako se za jednaku debljinu prevlake povišenjem tvrdoće prevlake snižava prekidna čvrstoća.

4.7.1 Rezultati ispitivanja granice razvlačenja

U tablici 4.7 prikazani su rezultati obrade za granicu razvlačenja R_r . U tom slučaju faktor A – debljina prevlake je signifikantni faktor (tj. on utječe na promjenu granice razvlačenja). Da bi neki faktor utjecao na promjenu trebala bi vrijednost u tablici 4.7 u zadnjem stupcu biti manja

od 0,05. Odstupanje od modela je neznačajno. Rezultati ispitivanja granice razvlačenja dani su u prilogu u tablici 8.3.

U tablici 4.8 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu. Koeficijent determiniranosti r^2 (e. *R-squared*) je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je r^2 bliži 1, to model bolje slijedi podatke. Računa se prema jednadžbi: [1]

$$r^2 = 1 - \frac{SKOostatka}{SKOmodela + SKOostatka} \quad (4.3)$$

gdje je: r^2 - koeficijent determiniranosti, SKO – suma kvadrata odstupanja.

Tablica 4.7. Rezultati analize varijance – granica razvlačenja

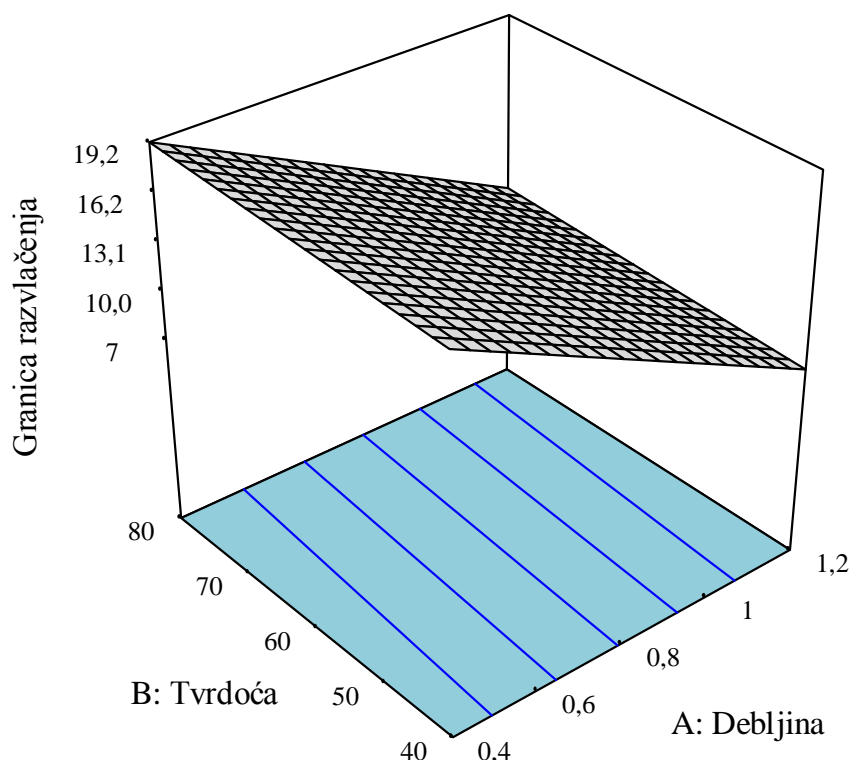
| | Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>) | Stupnjevi slobode DF | Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean square</i>) | Varijabla F (e. <i>F Value</i>) | Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>) |
|---|--|----------------------|---|----------------------------------|---|
| Model | 245,37 | 2 | 122,68 | 124,78 | < 0,0001 značajno |
| A | 244,25 | 1 | 244,25 | 248,43 | < 0,0001 |
| B | 1,21 | 1 | 1,12 | 1,14 | 0,3013 |
| Ostatak (e. <i>Residual</i>) | 15,73 | 16 | 0,98 | | |
| Odstupanje od modela (e. <i>Lack of Fit</i>) | 15,22 | 13 | 1,17 | 6,92 | 0,0686 neznačajno |
| Pogreška (e. <i>Pure Error</i>) | 0,51 | 3 | 0,17 | | |
| Ukupno (e. <i>Cor Total</i>) | 261,10 | 18 | | | |

Tablica 4.8. Pregled statističkih podataka o modelu za granicu razvlačenja

| | Granica razvlačenja |
|---|---------------------|
| Standardno odstupanje (e. <i>Standard Deviation</i>) | 0,99 |
| Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>) | 13,11 |
| Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R - Squared</i>) | 0,9398 |

Slika 4.14 prikazuje ovisnost granice razvlačenja o debljini i tvrdoći prevlake. Iz nje se može uočiti da debljina prevlake ima znatno veći utjecaj na granicu razvlačenja od tvrdoće

prevlake. Povećanjem debljine prevlake granica razvlačenja se snižava dok sniženje tvrdoće prevlake jako malo utječe na sniženje granice razvlačenja.



Slika 4.14. Ovisnost granice razvlačenja o debljini i tvrdoći prevlake

Kodirana jednadžba za izračunavanje granice razvlačenja:

$$R_r = 13,09 - 5,71 \cdot A + 0,42 \cdot B \quad (4.4)$$

Jednadžba za izračunavanje granice razvlačenja sa stvarnim faktorima:

$$R_r = 23,25048 - 14,26667 \cdot debljina + 0,020857 \cdot tvrdoća \quad (4.5)$$

pa će npr. za $A = 1,2$ mm (kodirana vrijednost 1) i $B = 40$ Shore A (kodirana vrijednost -1) očekivana granica razvlačenja biti 6,96.

4.7.2 Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće

U tablici 4.9 prikazani su rezultati obrade za prekidnu čvrstoću R_p . Utjecajni faktori su A, B i njihov umnožak AB. Odstupanje od modela je neznačajno. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće dani su u prilogu u tablici 8.4.

U tablici 4.10 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

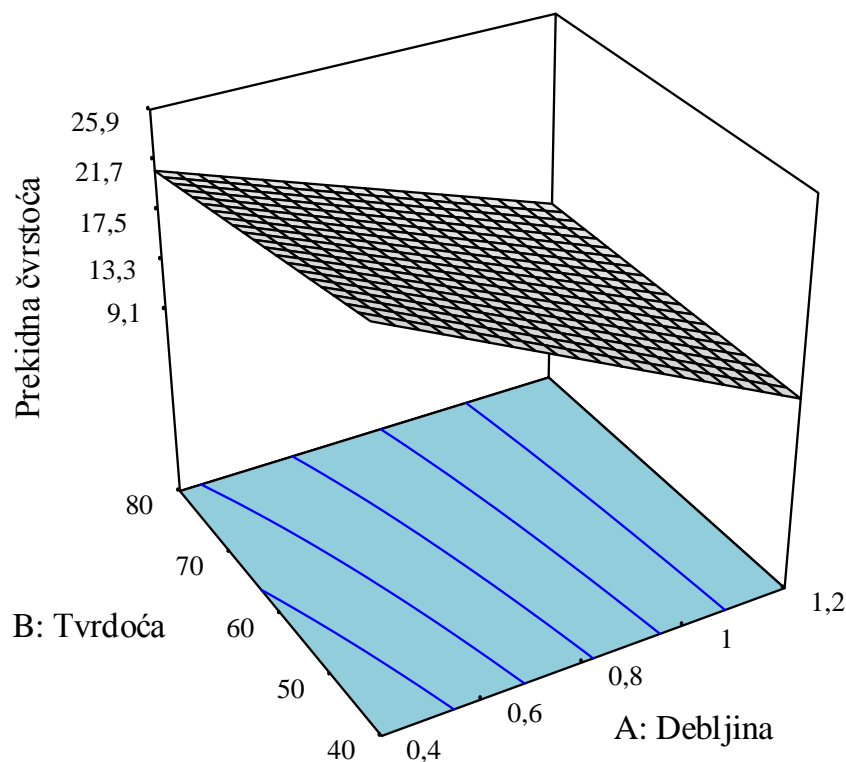
Tablica 4.9. Rezultati analize varijance – prekidna čvrstoća

| | Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>) | Stupnjevi slobode DF | Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean square</i>) | Varijabla F (e. <i>F Value</i>) | Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>) |
|--|---|-------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Model | 398,43 | 3 | 132,81 | 389,41 | < 0,0001 značajno |
| A | 381,63 | 1 | 381,63 | 1118,98 | < 0,0001 |
| B | 10,68 | 1 | 10,68 | 31,31 | < 0,0001 |
| AB | 6,12 | 1 | 6,12 | 17,94 | 0,0007 |
| Ostatak (e. <i>Residual</i>) | 5,12 | 15 | 0,34 | | |
| Odstupanje od modela (e. <i>Lack of Fit</i>) | 4,97 | 12 | 0,41 | 8,42 | 0,0527 neznačajno |
| Pogreška (e. <i>Pure Error</i>) | 0,15 | 3 | 0,049 | | |
| Ukupno (e. <i>Cor Total</i>) | 403,55 | 18 | | | |

Tablica 4.10. Pregled statističkih podataka o modelu za prekidnu čvrstoću

| | Prekidna čvrstoća |
|---|-------------------|
| Standardno odstupanje (e. <i>Standard Deviation</i>) | 0,58 |
| Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>) | 16,25 |
| Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R - Squared</i>) | 0,9873 |

Slika 4.15 prikazuje ovisnost prekidne čvrstoće o debljini i tvrdoći prevlake. Iz nje se može uočiti da debljina prevlake ima nešto veći utjecaj na prekidnu čvrstoću od tvrdoće prevlake. Povećanjem debljine prevlake prekidna čvrstoća se znatno snižava, dok je sniženje prekidne čvrstoće s povećanjem tvrdoće prevlake manjeg intenziteta. Najveća prekidna čvrstoća se postiže kad je debljina prevlake najmanja i njena tvrdoća najniža.



Slika 4.15. Ovisnost prekidne čvrstoće o debljini i tvrdoći prevlake

Kodirana jednadžba za izračunavanje prekidne čvrstoće:

$$R_p = 16,32 - 7,13 \cdot A - 1,29 \cdot B + 1,2 \cdot A \cdot B \quad (4.6)$$

Jednadžba za izračunavanje prekidne čvrstoće sa stvarnim faktorima:

$$R_p = 41,64259 - 26,83333 \cdot \text{debljina} - 0,18435 \cdot \text{tvrdoća} + 0,15 \cdot \text{debljina} \cdot \text{tvrdoća} \quad (4.7)$$

Potrebno je napomenuti kako je u većini slučajeva vrijednost prekidne čvrstoće R_p jednaka vrijednosti rastezne čvrstoće R_m te je odlučeno kako će se kroz analizu varijanci provesti samo prekidna čvrstoća R_p .

4.7.3 Rezultati ispitivanja prekidnog istezanja

U tablici 4.11 prikazani su rezultati obrade za prekidno istezanje ε_p . Utjecajni faktori su B, B², AB, B³ i AB². Odstupanje od modela je neznajčajno. Rezultati ispitivanja prekidnog istezanja dani su u prilogu u tablici 8.5.

U tablici 4.12 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

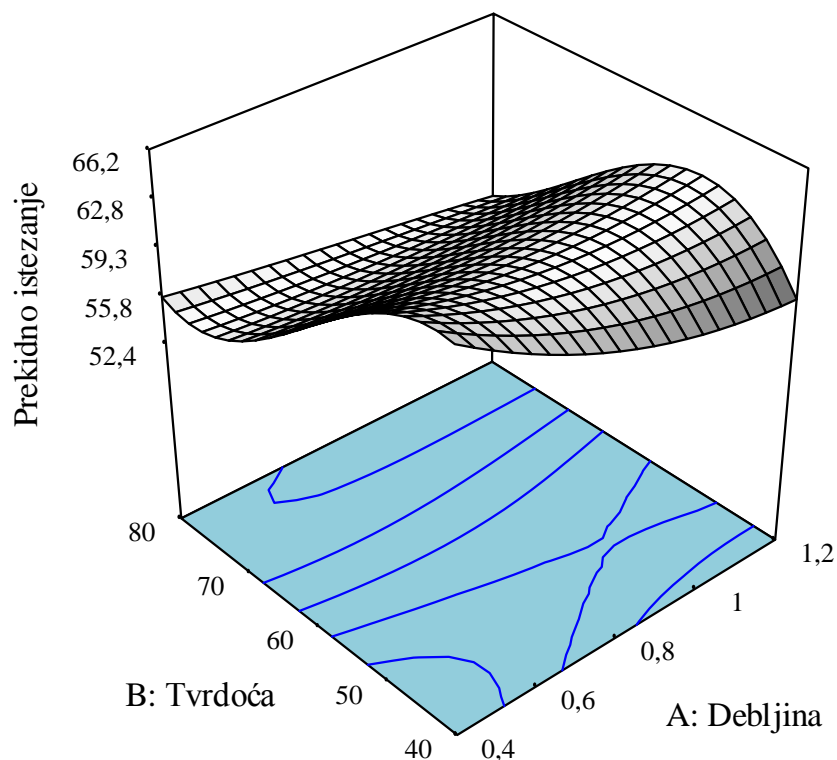
Tablica 4.11. Rezultati analize varijance – prekidno istezanje

| | Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>) | Stupnjevi slobode DF | Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean square</i>) | Varijabla F (e. <i>F Value</i>) | Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>) |
|--|---|-------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Model | 198,81 | 9 | 22,09 | 20,41 | < 0,0001 značajno |
| A | 0,10 | 1 | 0,10 | 0,094 | 0,7661 |
| B | 45,41 | 1 | 45,41 | 41,97 | 0,0001 |
| AB | 8,12 | 1 | 8,12 | 7,51 | 0,0229 |
| A ² | 1,89 | 1 | 1,89 | 1,75 | 0,2189 |
| B ² | 9,82 | 1 | 9,82 | 9,08 | 0,0147 |
| A ² B | 0,49 | 1 | 0,49 | 0,45 | 0,5171 |
| AB ² | 15,09 | 1 | 15,09 | 13,95 | 0,0047 |
| A ³ | 0,006409 | 1 | 0,006409 | 0,005922 | 0,9403 |
| B ³ | 6,72 | 1 | 6,72 | 6,21 | 0,0343 |
| Ostatak (e. <i>Residual</i>) | 9,74 | 9 | 1,08 | | |
| Odstupanje od modela (e. <i>Lack of Fit</i>) | 6,14 | 6 | 1,02 | 0,85 | 0,6047 neznačajno |
| Pogreška (e. <i>Pure Error</i>) | 3,60 | 3 | 1,200 | | |
| Ukupno (e. <i>Cor Total</i>) | 208,55 | 18 | | | |

Tablica 4.12. Pregled statističkih podataka o modelu za prekidno istezanje

| | Prekidno istezanje |
|---|--------------------|
| Standardno odstupanje (e. <i>Standard Deviation</i>) | 1,04 |
| Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>) | 58,76 |
| Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R - Squared</i>) | 0,9533 |

Slika 4.16 prikazuje ovisnost prekidnog istezanja o debljini i tvrdoći prevlake. Iz nje se vidi da se sa povišenjem tvrdoće znatno snižava prekidno istezanje. Najviša vrijednost prekidnog istezanja se postiže kada su vrijednosti debljine i tvrdoće prevlake najniže..



Slika 4.16. Ovisnost prekidnog istezanja o debljini i tvrdoći prevlake

Kodirana jednadžba za izračunavanje prekidnog istezanja:

$$\varepsilon_p = 59,37 + 0,35 \cdot A - 7,44 \cdot B + 1,01 \cdot A^2 - 2,53 \cdot B^2 + 1,38 \cdot A \cdot B - 0,11 \cdot A^3 + 4,66 \cdot B^3 - 0,96 \cdot A^2 \cdot B - 3,34 \cdot A \cdot B^2 \quad (4.8)$$

Jednadžba za izračunavanje prekidnog istezanja sa stvarnim faktorima:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = & 17,2522 - 126,76111 \cdot \text{debljina} + 4,34252 \cdot \text{tvrdoća} + 28,36491 \\ & \cdot \text{debljina}^2 - 0,094441 \cdot \text{tvrdoća}^2 + 3,1566 \cdot \text{debljina} \\ & \cdot \text{tvrdoća} - 1,68269 \cdot \text{debljina}^3 + 0,0005822 \cdot \text{tvrdoća}^3 \\ & - 0,29997 \cdot \text{debljina}^2 \cdot \text{tvrdoća} - 0,020865 \cdot \text{debljina} \\ & \cdot \text{tvrdoća}^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.7.4 Rezultati ispitivanja modula elastičnosti

U tablici 4.13 prikazani su rezultati obrade za modul elastičnosti E . Utjecajni faktor je A. Odstupanje od modela je neznčajno. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti dani su u prilogu u tablici 8.6.

U tablici 4.14 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

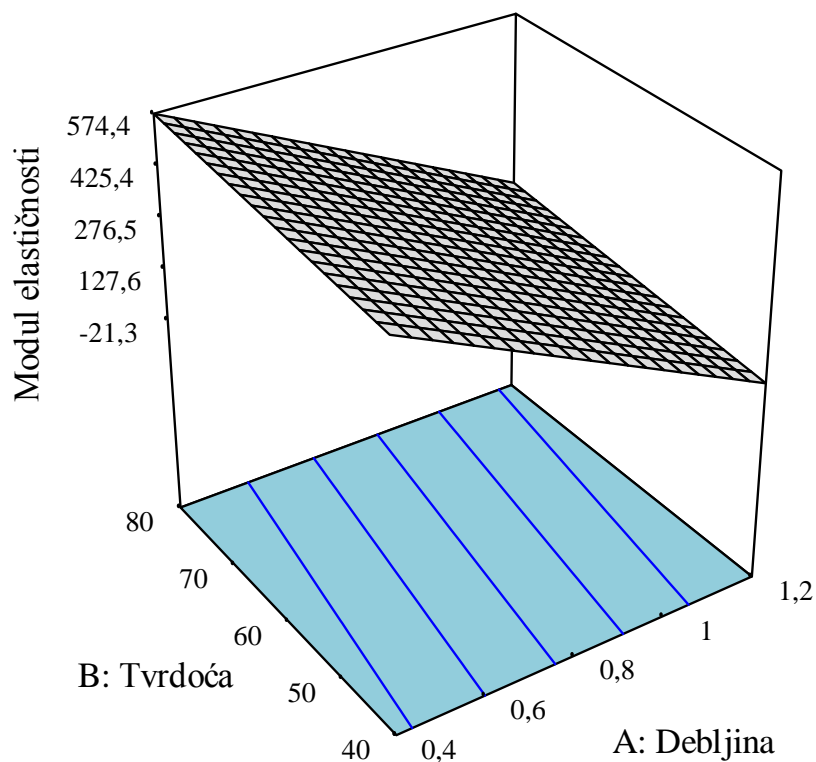
Tablica 4.13. Rezultati analize varijance – modul elastičnosti

| | Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>) | Stupnjevi slobode DF | Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean square</i>) | Varijabla F (e. <i>F Value</i>) | Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>) |
|--|---|-------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Model | 512097,83 | 2 | 256048,91 | 80,68 | < 0,0001 značajno |
| A | 502253,16 | 1 | 502253,16 | 158,27 | < 0,0001 |
| B | 9844,66 | 1 | 9844,66 | 3,10 | 0,0973 |
| Ostatak (e. <i>Residual</i>) | 50775,58 | 16 | 3173,47 | | |
| Odstupanje od modela (e. <i>Lack of Fit</i>) | 30411,39 | 13 | 2339,34 | 0,34 | 0,9249 neznačajno |
| Pogreška (e. <i>Pure Error</i>) | 20364,19 | 3 | 6788,06 | | |
| Ukupno (e. <i>Cor Total</i>) | 562873,40 | 18 | | | |

Tablica 4.14. Pregled statističkih podataka o modelu za modul elastičnosti

| | Modul elastičnosti |
|---|--------------------|
| Standardno odstupanje (e. <i>Standard Deviation</i>) | 56,33 |
| Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>) | 278,56 |
| Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R - Squared</i>) | 0,9098 |

Slika 4.17 prikazuje ovisnost modula elastičnosti o debljini i tvrdoći prevlake. Iz nje se vidi da se sa povišenjem tvrdoće modul elastičnosti ne mijenja značajno dok se sniženjem debljine prevlake modul elastičnosti značajno povisuje. Najvišu vrijednost modul elastičnosti postiže kad je tvrdoća prevlake najviša, a vrijednost njene debljine najniža.



Slika 4.17. Ovisnost modula elastičnosti o debljini i tvrdoći prevlake

Kodirana jednadžba za izračunavanje modula elastičnosti:

$$E = 276,51 - 258,78 \cdot A + 39,08 \cdot B \quad (4.10)$$

Jednadžba za izračunavanje modula elastičnosti sa stvarnim faktorima:

$$E = 676,83878 - 646,95 \cdot debljina + 1,9538 \cdot tvrdoća \quad (4.11)$$

4.7.5 Rezultati ispitivanja tvrdoće

U tablici 4.15 prikazani su rezultati obrade za tvrdoću. Ona će u ovom slučaju biti označena oznakom Y , a njena je vrijednost dobivena po Shore A skali. Utjecajni faktori su A , B , A^2 , AB i A^3 . odstupanje od modela je neznačajno. Rezultati ispitivanja tvrdoće dani su u prilogu u tablici 8.7.

U tablici 4.16 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

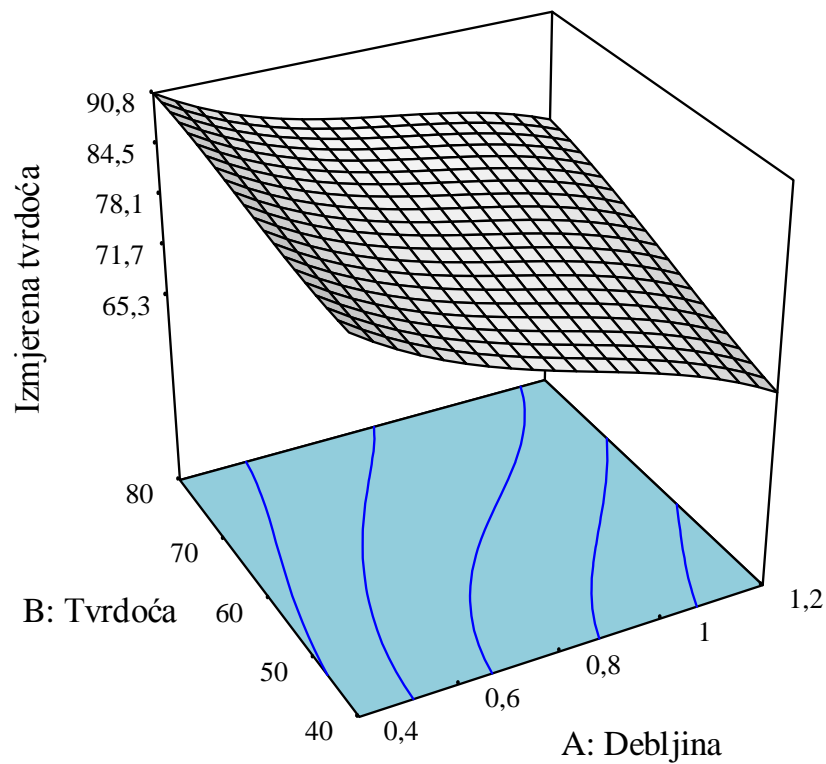
Tablica 4.15. Rezultati analize varijance – tvrdoća

| | Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>) | Stupnjevi slobode DF | Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean square</i>) | Varijabla F (e. <i>F Value</i>) | Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>) |
|--|---|-------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Model | 632,14 | 9 | 70,24 | 489,99 | < 0,0001 značajno |
| A | 26,05 | 1 | 26,05 | 181,748 | < 0,0001 |
| B | 18,08 | 1 | 18,08 | 126,13 | < 0,0001 |
| AB | 12,71 | 1 | 12,71 | 88,67 | < 0,0001 |
| A ² | 2,21 | 1 | 2,21 | 15,43 | 0,0035 |
| B ² | 0,02 | 1 | 0,02 | 0,15 | 0,7118 |
| A ² B | 0,04 | 1 | 0,04 | 0,27 | 0,6142 |
| AB ² | 0,074 | 1 | 0,074 | 0,52 | 0,4905 |
| A ³ | 4,68 | 1 | 4,68 | 32,66 | 0,0003 |
| B ³ | 0,28 | 1 | 0,28 | 1,96 | 0,1950 |
| Ostatak (e. <i>Residual</i>) | 1,29 | 9 | 0,14 | | |
| Odstupanje od modela (e. <i>Lack of Fit</i>) | 1,03 | 6 | 0,17 | 1,98 | 0,3070 neznačajno |
| Pogreška (e. <i>Pure Error</i>) | 0,26 | 3 | 0,087 | | |
| Ukupno (e. <i>Cor Total</i>) | 633,43 | 18 | | | |

Tablica 4.16. Pregled statističkih podataka o modelu za tvrdoću

| | Tvrdoća |
|---|---------|
| Standardno odstupanje (e. <i>Standard Deviation</i>) | 0,38 |
| Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>) | 79,42 |
| Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R - Squared</i>) | 0,9980 |

Slika 4.18 prikazuje ovisnost izmjerene tvrdoće o debljini i tvrdoći prevlake. Vrijednost izmjerene tvrdoće se povisuje s povišenjem tvrdoće prevlake, a snižava s povišenjem debljine prevlake. Najviša vrijednost izmjerene tvrdoće postiže se pri najvišoj tvrdoći i najnižoj vrijednosti debljine prevlake.



Slika 4.18. Ovisnost izmjerene tvrdoće o debljini i tvrdoći prevlake

Kodirana jednadžba za izračunavanje tvrdoće:

$$Y = 78,83 - 5,6 \cdot A + 4,69 \cdot B + 1,1 \cdot A^2 - 0,12 \cdot B^2 + 1,73 \cdot A \cdot B - 2,91 \cdot A^3 - 0,95 \cdot B^3 + 0,27 \cdot A^2 \cdot B - 0,23 \cdot A \cdot B^2 \quad (4.12)$$

Jednadžba za izračunavanje tvrdoće sa stvarnim faktorima:

$$\begin{aligned} Y = & 139,62621 - 122,39339 \cdot debljina - 1,27531 \cdot tvrdoća \\ & + 110,92767 \cdot debljina^2 + 0,022308 \cdot tvrdoća^2 + 0,2563 \\ & \cdot debljina \cdot tvrdoća - 45,48077 \cdot debljina^3 - 0,000119 \\ & \cdot tvrdoća^3 + 0,084537 \cdot debljina^2 \cdot tvrdoća - 0,001461 \\ & \cdot debljina \cdot tvrdoća^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

5 RASPRAVA REZULTATA

Nakon provedenog ispitivanja utjecaja parametara debljine gumene prevlake i tvrdoće na rastezna svojstva polimernog proizvoda te provedene analize rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava ustanovljeno je da je odstupanje od modela (e. *Lack of Fit*) neznačajno za svaku od analiziranih veličina što je dokaz dobro postavljenog modela pokusa. Također, za svako od analiziranih svojstava barem jedan od dvaju ulaznih faktora (A – debljina prevlake, B – tvrdoća prevlake) ima značajan utjecaj na promjenu ispitivanog svojstva za konkretni slučaj. Koeficijent determiniranosti za svako analizirano svojstvo je veći od 0,9, a u većini slučajeva je i jako blizu vrijednosti 1 što je dokaz da model jako dobro slijedi podatke.

Provedenim ispitivanjem i analizom rezultata dolazi se do zaključka da debljina prevlake značajno utječe na granicu razvlačenja, prekidnu čvrstoću, modul elastičnosti i tvrdoću na način da se vrijednosti navedenih svojstava snižavaju s povećanjem debljine prevlake. Utjecaj debljine na prekidno rastezanje nije toliko značajan.

Tvrdoća prevlake ima značajan utjecaj na prekidnu čvrstoću, prekidno istezanje i tvrdoću. S povišenjem tvrdoće prevlake snižava se prekidna čvrstoća i prekidno istezanje, dok se izmjerena tvrdoća povisuje. Utjecaj tvrdoće prevlake na granicu razvlačenja i modul elastičnosti je neznačajan.

Dobiveni dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za sva stanja pokusa prikazuje logični utjecaj parametara izrade. Naime, kao što je ranije navedeno, točno se vidi utjecaj debljine prevlake na granicu razvlačenja koja se snižava s povišenjem vrijednosti debljine prevlake. Također se iz grafa može iščitati kako se za jednaku debljinu prevlake povišenjem tvrdoće prevlake smanjuje prekidna čvrstoća.

Na primjeru granice razvlačenja vidi se povezanost odzivne površine za to svojstvo s dijagramom rasteznog naprezanja – istezanja pošto je vidljivo da se s povišenjem debljine prevlake granica razvlačenja snižava. Takva se povezanost može naći i za druga mehanička svojstva ispitana u ovom eksperimentu.

6 ZAKLJUČAK

Aditivni postupci u velikom su zamahu te se ubrzano razvijaju. Nekada su služili isključivo za izradu prototipova dok danas razvitak ide u smjeru proizvodnje gotovih tvorevina spremnih za tržište. Dobre strane tih postupaka su mnogobrojne, a kao najveća prednost se ističe činjenica da ono što se vidi može se i pretvoriti u CAD model, a aditivnim postupcima i izraditi. Ograničenja koja ih koče tiču se ponajprije dostupnih materijala, odnosno mehaničkih svojstava tih materijala. Na tom se ograničenju temelji i eksperimentalni dio ovog rada gdje se željelo ispitati kako će na mehanička svojstva tvorevine utjecati kombiniranje različitih debljina i tvrdoća prevlake nanese na čvrstu jezgru.

Iz provedenih ispitivanja i analiziranja istih zaključuje se da parametri debljina i tvrdoća prevlake značajno utječu na rastezna svojstva dobivenih izradaka. Uslijed povećanja debljine prevlake vrijednosti prekidne čvrstoće, prekidnog istezanja, modula elastičnosti i tvrdoće se značajno snižavaju. Povišenje vrijednosti tvrdoće prevlake ima značajan utjecaj na sniženje prekidne čvrstoće i prekidnog istezanja odnosno na povišenje izmjerene tvrdoće.

Eksperiment je time opravdao očekivanja i može poslužiti za daljnja istraživanja na tom području.

7 LITERATURA

- [1] Pilipović, A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa*, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2012.
- [2] Wohlers, T., Gornet, T.: *History of additive manufacturing*, Wohlers Report 2014
- [3] Godec, D., Šercer, M.: *Brza proizvodnja kalupa*, Polimeri, 28(2007)1, 32 - 39, FSB, Zagreb, 2007.
- [4] http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm, 13.4.2015.
- [5] *RT – Rapid Tooling*, <http://www.factoryoffactories.com/rapidtool.htm>, 13.4.2015.
- [6] Godec, D.: *Brza proizvodnja kalupa*, Aditivne tehnologije za mala i srednja poduzeća, FSB, Zagreb, 28.5.2013.
- [7] Gebhardt, A.: *Understanding Additive Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [8] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies* (Second edition), Springer, New York, 2015.
- [9] Šimunić, N., Benić, Z., Brozović, M.: *Postupci brze izrade prototipova*
- [10] Wohlers, T.: Wohlers Report 2013.
- [11] De Beer, N.: *Additive Manufacturing – Turning Mind into Matter*, Sierra College Center for Applied Competitive Technologies (CACT), 31.5.2013.
- [12] Godec, D., Šercer, M.: *Aditivna proizvodnja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [13] Pilipović, A., Raos, P., Šercer, M.: *Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2009)40: 105 - 115
- [14] Enamul Hoque, M.: *Advanced applications of rapid prototyping in modern engineering*, InTech, Rijeka, 2011.
- [15] J. Ofek, G.: *Multi – material prototyping using Additive Manufacturing enhances industry's efficiency*, Stratasys
- [16] Sagi, O.: *PolyJet Matrix Technology – A New Direction in 3D Printing*, Objet, 2009.
- [17] Baker, C.: *Objet Geometries – The latest Advances*, Objet
- [18] Smith, T.: *Introducing the Objet 500 Connex 3*, TRI-TECH 3D
- [19] web stranice proizvođača Stratasys, <http://www.stratasys.com/>, 13.4.2015.
- [20] *FullCure Materials*, promidžbeni materijal tvrtke Stratasys

- [21] <http://www.padtinc.com/blog/the-rp-resource/stratasys-adds-flexible-color-to-their-digital-material-palettes>, 1.7.2015.
- [22] http://www.smg3d.co.uk/hearing_aids/objet350_connex_3d_printer_from_stratasys, 13.4.2015.
- [23] Srbić, T.: *Utjecaj parametara postupka selektivnog laserskog sraščivanja na kvalitetu prototipa*, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [24] <http://www.mcad.com/3d-printing/3d-printing-materials/polyjet-materials/> , 16.6.2015.
- [25] <http://www.3dvision.com/stratasys-3d-printing/design-series/objet-connex-3d-printers/objet-connex350>, 17.6.2015.
- [26] HRN EN ISO 527: 2012 Plastika – Određivanje rasteznih svojstava (ISO 527: 2012, EN ISO 527: 2012) (Plastic – Determination of tensile properties)
- [27] HRN EN ISO 868: 2008 – Određivanje utisne tvrdoće pomoću durometra (Tvrdoća prema Shoreu) (ISO 868:2003; EN ISO 868:2003)

8 PRILOZI

Tablica 8.1 Rezultati mjerenja s kodiranim vrijednostima faktora A i B

Tablica 8.2 Rezultati ispitivanja dimenzijske točnosti

Tablica 8.3 Rezultati ispitivanja granice razvlačenja

Tablica 8.4 Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće

Tablica 8.5 Rezultati ispitivanja prekidnog istezanja

Tablica 8.6 Rezultati ispitivanja modula elastičnosti

Tablica 8.7 Rezultati ispitivanja tvrdoće

Tablica 8.1. Rezultati mjerenja s kodiranim vrijednostima faktora A i B

| Stanje pokusa | Faktor A: Debljina prevlake [mm] | Faktor B: Tvrdća prevlake, Shore A | Granica razvlačenja, R_r [MPa] | Prekidna čvrstoća, R_p [MPa] | Prekidno istezanje, ε_p [%] | Modul elastičnosti, E [MPa] | Tvrdća, Shore A |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|-----------------|
| 1 | 0,5 | 0,5 | 11,2 | 12,5 | 56,1 | 115,7 | 78,2 |
| 2 | -0,5 | -0,5 | 16,6 | 22,1 | 63,7 | 389,8 | 80,6 |
| 3 | 1 | 0 | 7,1 | 9,6 | 60,4 | 51,8 | 71,4 |
| 4 | 1 | 1 | 7,2 | 9,2 | 52,4 | 31,5 | 76,9 |
| 5 | -1 | -1 | 16,4 | 25,7 | 66,0 | 441,7 | 86,3 |
| 6 | 0 | 1 | 13,1 | 15,1 | 54,0 | 282,8 | 82,4 |
| 7 | 0 | 0 | 12,1 | 15,9 | 59,7 | 407,9 | 79,1 |
| 8 | 0 | -0,5 | 15,5 | 17,9 | 60,9 | 333,5 | 76,2 |
| 9 | -0,5 | 0,5 | 17,0 | 19,2 | 57,0 | 445,5 | 84,4 |
| 10 | 1 | -1 | 7,2 | 8,9 | 56,9 | 23,2 | 65,3 |
| 11 | 0,5 | -0,5 | 10,1 | 13,4 | 62,9 | 68,4 | 73,4 |
| 12 | -1 | 0 | 19,2 | 23,2 | 60,0 | 517,8 | 88,5 |
| 13 | 0 | 1 | 15,8 | 20,8 | 63,8 | 270,4 | 74,1 |
| 14 | -0,5 | 0 | 15,6 | 19,1 | 59,0 | 352,6 | 81,6 |
| 15 | 0 | 0 | 12,7 | 15,7 | 58,5 | 236,3 | 78,6 |
| 16 | -1 | 1 | 19,7 | 21,4 | 55,6 | 643,4 | 90,8 |
| 17 | 0 | 0,5 | 12,8 | 15,4 | 55,1 | 305,9 | 81,1 |
| 18 | 0 | 0 | 12,6 | 16,1 | 60,3 | 230,5 | 79,0 |
| 19 | 0,5 | 0 | 9,9 | 12,7 | 60,0 | 114,9 | 75,9 |
| 20 | 0 | 0 | 13,1 | 15,6 | 57,9 | 299,5 | 79,3 |

Tablica 8.2. Rezultati ispitivanja dimenzijske točnosti

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | b_1 , mm | h , mm | $A = b_1 \cdot h$, mm ² | b_2 , mm | l , mm |
|---------------|----------------|------------|----------|-------------------------------------|------------|----------|
| 1 | 1 | 9,99 | 4 | 39,96 | 20 | 150,14 |
| | 2 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20 | 150,16 |
| | 3 | 9,96 | 4,01 | 39,94 | 20,01 | 150,15 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,94 | 20,00 | 150,15 |
| S | | 0,0153 | 0,0058 | 0,0200 | 0,0058 | 0,0100 |
| 2 | 1 | 9,99 | 4 | 39,96 | 19,99 | 150,17 |
| | 2 | 10 | 4 | 40,00 | 19,99 | 150,17 |
| | 3 | 9,95 | 4 | 39,80 | 19,99 | 150,16 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 19,99 | 150,17 |
| S | | 0,0265 | 0,0000 | 0,1058 | 0,0000 | 0,0058 |
| 3 | 1 | 10 | 4 | 40,00 | 20,01 | 150,12 |
| | 2 | 10,01 | 3,99 | 39,94 | 20,02 | 150,17 |
| | 3 | 9,99 | 3,99 | 39,86 | 20,01 | 150,18 |
| \bar{x} | | 10,00 | 3,99 | 39,93 | 20,01 | 150,16 |
| S | | 0,0100 | 0,0058 | 0,0702 | 0,0058 | 0,0321 |
| 4 | 1 | 9,99 | 3,99 | 39,86 | 20,01 | 150,17 |
| | 2 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20,03 | 150,18 |
| | 3 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,17 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,87 | 20,01 | 150,17 |
| S | | 0,0115 | 0,0058 | 0,0115 | 0,0153 | 0,0058 |
| 5 | 1 | 9,95 | 4,01 | 39,90 | 19,96 | 150,11 |
| | 2 | 9,95 | 4,01 | 39,90 | 19,96 | 150,05 |
| | 3 | 9,93 | 4,01 | 39,82 | 20,01 | 150,06 |
| \bar{x} | | 9,94 | 4,01 | 39,87 | 19,98 | 150,07 |
| S | | 0,0115 | 0,0000 | 0,0463 | 0,0289 | 0,0321 |
| 6 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20,01 | 150,11 |
| | 2 | 9,95 | 4 | 39,80 | 20 | 150,11 |
| | 3 | 10 | 4 | 40,00 | 20,02 | 150,16 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,89 | 20,01 | 150,13 |
| S | | 0,0252 | 0,0000 | 0,1007 | 0,0100 | 0,0289 |
| 7 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 19,98 | 150,04 |
| | 2 | 9,95 | 4 | 39,80 | 19,98 | 150,04 |
| | 3 | 9,99 | 4 | 39,96 | 19,99 | 150,11 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,88 | 19,98 | 150,06 |
| S | | 0,0200 | 0,0000 | 0,0800 | 0,0058 | 0,0404 |

Tablica 8.2. Rezultati ispitivanja dimenzijske točnosti – nastavak

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | b_1 , mm | h , mm | $A = b_1 \cdot h$, mm ² | b_2 , mm | l , mm |
|---------------|----------------|------------|----------|-------------------------------------|------------|----------|
| 8 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,15 |
| | 2 | 9,99 | 4 | 39,96 | 19,99 | 150,12 |
| | 3 | 9,98 | 4 | 39,92 | 19,98 | 150,13 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 19,99 | 150,13 |
| S | | 0,0100 | 0,0000 | 0,0400 | 0,0100 | 0,0153 |
| 9 | 1 | 10 | 4 | 40,00 | 20,03 | 150,15 |
| | 2 | 9,95 | 4 | 39,80 | 20 | 150,15 |
| | 3 | 9,95 | 4 | 39,80 | 20 | 150,14 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,87 | 20,01 | 150,15 |
| S | | 0,0289 | 0,0000 | 0,1155 | 0,0173 | 0,0058 |
| 10 | 1 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20,01 | 150,18 |
| | 2 | 9,97 | 3,99 | 39,78 | 20 | 150,14 |
| | 3 | 10 | 3,99 | 39,90 | 20 | 150,16 |
| \bar{x} | | 9,98 | 3,99 | 39,87 | 20,00 | 150,16 |
| S | | 0,0153 | 0,0058 | 0,0755 | 0,0058 | 0,0200 |
| 11 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,16 |
| | 2 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20,01 | 150,17 |
| | 3 | 10 | 4 | 40,00 | 20,03 | 150,18 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,93 | 20,01 | 150,17 |
| S | | 0,0153 | 0,0000 | 0,0611 | 0,0153 | 0,0100 |
| 12 | 1 | 9,97 | 4,01 | 39,98 | 19,99 | 150,18 |
| | 2 | 9,96 | 4,01 | 39,94 | 20 | 150,15 |
| | 3 | 9,97 | 4 | 39,88 | 19,97 | 150,15 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,01 | 39,93 | 19,99 | 150,16 |
| S | | 0,0058 | 0,0058 | 0,0502 | 0,0153 | 0,0173 |
| 13 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,19 |
| | 2 | 9,97 | 4,01 | 39,98 | 19,98 | 150,15 |
| | 3 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20 | 150,18 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,93 | 19,99 | 150,17 |
| S | | 0,0058 | 0,0058 | 0,0502 | 0,0115 | 0,0208 |
| 14 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,14 |
| | 2 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20 | 150,16 |
| | 3 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,18 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,89 | 20,00 | 150,16 |
| S | | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0000 | 0,0200 |

Tablica 8.2. Rezultati ispitivanja dimenzijske točnosti – nastavak

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | b_1 , mm | h , mm | $A = b_1 \cdot h$, mm ² | b_2 , mm | l , mm |
|---------------|----------------|------------|----------|-------------------------------------|------------|----------|
| 15 | 1 | 9,98 | 4 | 39,92 | 19,99 | 150,18 |
| | 2 | 9,99 | 4 | 39,96 | 20 | 150,19 |
| | 3 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20 | 150,16 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,93 | 20,00 | 150,18 |
| S | | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0058 | 0,0153 |
| 16 | 1 | 9,96 | 4,01 | 39,94 | 20,01 | 150,18 |
| | 2 | 9,97 | 4,01 | 39,98 | 20 | 150,19 |
| | 3 | 9,96 | 4,01 | 39,94 | 20,02 | 150,19 |
| | | 9,96 | 4,01 | 39,95 | 20,01 | 150,19 |
| S | | 0,0058 | 0,0000 | 0,0232 | 0,0100 | 0,0058 |
| 17 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 19,98 | 150,1 |
| | 2 | 9,98 | 3,99 | 39,82 | 19,99 | 150,11 |
| | 3 | 9,97 | 4 | 39,88 | 19,98 | 150,17 |
| \bar{x} | | 9,97 | 4,00 | 39,86 | 19,98 | 150,13 |
| S | | 0,0058 | 0,0058 | 0,0345 | 0,0058 | 0,0379 |
| 18 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20 | 150,15 |
| | 2 | 9,96 | 4,01 | 39,94 | 20 | 150,16 |
| | 3 | 10 | 3,99 | 39,90 | 20 | 150,2 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,91 | 20,00 | 150,17 |
| S | | 0,0208 | 0,0100 | 0,0303 | 0,0000 | 0,0265 |
| 19 | 1 | 9,97 | 4 | 39,88 | 19,99 | 150,15 |
| | 2 | 9,98 | 4 | 39,92 | 19,99 | 150,15 |
| | 3 | 9,98 | 4 | 39,92 | 19,99 | 150,18 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,91 | 19,99 | 150,16 |
| S | | 0,0058 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0000 | 0,0173 |
| 20 | 1 | 9,98 | 4 | 39,92 | 20 | 150,16 |
| | 2 | 9,97 | 4 | 39,88 | 20,01 | 150,17 |
| | 3 | 9,99 | 4 | 39,96 | 20 | 150,18 |
| \bar{x} | | 9,98 | 4,00 | 39,92 | 20,00 | 150,17 |
| S | | 0,0100 | 0,0000 | 0,0400 | 0,0058 | 0,0100 |

Tablica 8.3. Rezultati ispitivanja granice razvlačenja

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | | | \bar{x} | S |
|---------------|----------------|------|------|-----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 11,7 | 11,7 | 10,2 | 11,2 | 0,855 |
| 2 | 15,7 | 18,6 | 15,5 | 16,6 | 1,706 |
| 3 | 6,6 | 7,2 | 7,4 | 7,1 | 0,416 |
| 4 | 7,3 | 7,2 | 7,0 | 7,2 | 0,114 |
| 5 | 18,7 | 15,1 | 15,5 | 16,4 | 1,979 |
| 6 | 14,5 | 11,2 | 13,4 | 13,1 | 1,680 |
| 7 | 13,1 | 12 | 11,4 | 12,1 | 0,860 |
| 8 | 12,2 | 18,2 | 16,3 | 15,5 | 3,063 |
| 9 | 18,2 | 16 | 16,7 | 17 | 1,132 |
| 10 | 6,9 | 7,6 | 7,1 | 7,2 | 0,390 |
| 11 | 9,4 | 10,4 | 10,6 | 10,1 | 0,621 |
| 12 | 18,7 | 19,6 | 19,3 | 19,2 | 0,491 |
| 13 | 12,5 | 16,9 | 17,8 | 15,8 | 2,817 |
| 14 | 15 | 16 | 16,0 | 15,6 | 0,593 |
| 15 | 13 | 12 | 13,2 | 12,7 | 0,662 |
| 16 | 19,7 | 18,9 | 20,6 | 19,7 | 0,874 |
| 17 | 12,4 | 12,8 | 13,3 | 12,8 | 0,432 |
| 18 | 11,5 | 12,1 | 14,3 | 12,6 | 1,503 |
| 19 | 10,7 | 9,6 | 9,4 | 9,9 | 0,705 |
| 20 | 13,7 | 11,6 | 14 | 13,1 | 1,301 |

Tablica 8.4. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | | | \bar{x} | S |
|---------------|----------------|------|------|-----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 13 | 12,8 | 11,7 | 12,5 | 0,679 |
| 2 | 20,8 | 25,3 | 20,2 | 22,1 | 2,761 |
| 3 | 9,3 | 9,6 | 9,9 | 9,6 | 0,306 |
| 4 | 9,3 | 9,1 | 9,1 | 9,2 | 0,145 |
| 5 | 25,9 | 25,2 | 26,1 | 25,7 | 0,492 |
| 6 | 15,6 | 14,4 | 15,4 | 15,1 | 0,644 |
| 7 | 15,8 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 0,051 |
| 8 | 15,5 | 21,6 | 16,8 | 17,9 | 3,218 |
| 9 | 19,3 | 19,1 | 19,3 | 19,2 | 0,103 |
| 10 | 8,8 | 9,6 | 8,3 | 8,9 | 0,661 |
| 11 | 13,1 | 13 | 14,2 | 13,4 | 0,643 |
| 12 | 22,5 | 24,0 | 23,1 | 23,2 | 0,755 |
| 13 | 15,6 | 22,9 | 24 | 20,8 | 4,542 |
| 14 | 18,8 | 19,5 | 18,9 | 19,1 | 0,375 |
| 15 | 16,5 | 14,1 | 16,6 | 15,7 | 1,379 |
| 16 | 21,9 | 20,6 | 21,6 | 21,4 | 0,651 |
| 17 | 14,5 | 16 | 15,5 | 15,4 | 0,792 |
| 18 | 15,4 | 16,0 | 17,0 | 16,1 | 0,773 |
| 19 | 13,2 | 12,5 | 12,4 | 12,7 | 0,450 |
| 20 | 15 | 16,1 | 15,8 | 15,6 | 0,570 |

Tablica 8.5. Rezultati ispitivanja prekidnog istežanja

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | | | \bar{x} | S |
|---------------|----------------|------|------|-----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 57 | 56,3 | 54,9 | 56,1 | 1,053 |
| 2 | 63,8 | 62,8 | 64,5 | 63,7 | 0,845 |
| 3 | 60,6 | 59,4 | 61,2 | 60,4 | 0,946 |
| 4 | 53,3 | 51,9 | 52,2 | 52,4 | 0,751 |
| 5 | 65,2 | 65,6 | 67,4 | 66,1 | 1,167 |
| 6 | 54,3 | 53,9 | 53,8 | 54 | 0,257 |
| 7 | 59,1 | 60,1 | 59,8 | 59,7 | 0,523 |
| 8 | 63 | 61,6 | 58,1 | 60,9 | 2,536 |
| 9 | 55,4 | 57,9 | 57,7 | 57 | 1,383 |
| 10 | 57,4 | 60,6 | 52,7 | 56,9 | 3,972 |
| 11 | 63,3 | 61,4 | 63,9 | 62,9 | 1,327 |
| 12 | 60,1 | 60,7 | 59,2 | 60 | 0,762 |
| 13 | 59,3 | 63,7 | 68,4 | 63,8 | 4,546 |
| 14 | 59,2 | 59,4 | 58,3 | 59 | 0,595 |
| 15 | 60,7 | 54,7 | 60,3 | 58,5 | 3,350 |
| 16 | 57,3 | 55,1 | 54,4 | 55,6 | 1,515 |
| 17 | 55,1 | 52,6 | 57,5 | 55,1 | 2,453 |
| 18 | 59,2 | 60,9 | 60,7 | 60,3 | 0,942 |
| 19 | 60 | 59,5 | 60,6 | 60 | 0,572 |
| 20 | 55,1 | 61,4 | 57,1 | 57,9 | 3,236 |

Tablica 8.6. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | | | \bar{x} | S |
|---------------|----------------|-------|-------|-----------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 86,6 | 166,6 | 93,9 | 115,7 | 44,214 |
| 2 | 339,7 | 420,3 | 383,1 | 381 | 40,312 |
| 3 | 69,3 | 62,4 | 23,7 | 51,8 | 24,581 |
| 4 | 25,9 | 34,9 | 33,8 | 31,5 | 4,922 |
| 5 | 484,9 | 408,5 | 431,8 | 441,7 | 39,160 |
| 6 | 182,5 | 248,2 | 417,8 | 282,8 | 121,418 |
| 7 | 319,8 | 270,4 | 633,5 | 407,9 | 196,911 |
| 8 | 210,3 | 420,6 | 369,5 | 333,5 | 109,661 |
| 9 | 444,6 | 442,9 | 449,1 | 445,5 | 3,199 |
| 10 | 25,6 | 20,1 | 24 | 23,2 | 2,838 |
| 11 | 35,9 | 56,5 | 112,8 | 68,4 | 39,841 |
| 12 | 497,3 | 461,4 | 594,8 | 517,8 | 69,020 |
| 13 | 218 | 327,7 | 265,7 | 270,4 | 55,008 |
| 14 | 300,3 | 342,3 | 415,2 | 352,6 | 58,129 |
| 15 | 207,4 | 111,4 | 390 | 236,3 | 141,527 |
| 16 | 693,9 | 542,7 | 693,6 | 643,4 | 87,205 |
| 17 | 225,3 | 395,1 | 297,1 | 305,9 | 85,215 |
| 18 | 199,9 | 246,7 | 245 | 230,5 | 26,587 |
| 19 | 129,9 | 105,9 | 109 | 114,9 | 13,033 |
| 20 | 303,9 | 222,9 | 371,8 | 299,5 | 74,502 |

Tablica 8.7. Rezultati ispitivanja tvrdoće

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | Tvrdoća | | | \bar{x} | S | $\bar{\bar{x}}$ | \bar{S} |
|---------------|----------------|---------|------|------|-----------|--------|-----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | | |
| 1 | 1 | 80 | 79 | 77,5 | 78,8 | 1,258 | 78,2 | 0,972 |
| | 2 | 79 | 78 | 77,5 | 78,2 | 0,764 | | |
| | 3 | 77 | 77,5 | 78,5 | 77,7 | 0,764 | | |
| 2 | 1 | 80,5 | 80 | 81,5 | 80,7 | 0,764 | 80,6 | 0,601 |
| | 2 | 81 | 81 | 79,5 | 80,5 | 0,866 | | |
| | 3 | 80,5 | 80,5 | 81 | 80,7 | 0,289 | | |
| 3 | 1 | 72,5 | 71 | 71,5 | 71,7 | 0,764 | 71,4 | 0,635 |
| | 2 | 71 | 71 | 71 | 71 | 0 | | |
| | 3 | 72,5 | 71 | 71,5 | 71,7 | 0,7638 | | |
| 4 | 1 | 78 | 78 | 77 | 77,7 | 0,577 | 76,9 | 0,741 |
| | 2 | 76,5 | 76 | 77 | 76,5 | 0,5 | | |
| | 3 | 76 | 76,5 | 77 | 76,5 | 0,5 | | |
| 5 | 1 | 86,5 | 87 | 87,5 | 87 | 0,500 | 86,3 | 1,677 |
| | 2 | 82,5 | 85 | 86,5 | 84,7 | 2,021 | | |
| | 3 | 86,5 | 87,5 | 88 | 87,3 | 0,764 | | |
| 6 | 1 | 82 | 83 | 83 | 82,7 | 0,577 | 82,4 | 0,682 |
| | 2 | 83 | 83 | 83 | 83 | 0 | | |
| | 3 | 81,5 | 82 | 81,5 | 81,7 | 0,289 | | |
| 7 | 1 | 80 | 80 | 80,5 | 80,2 | 0,289 | 79,1 | 1,102 |
| | 2 | 79 | 78 | 79,5 | 78,8 | 0,764 | | |
| | 3 | 78,5 | 79 | 77 | 78,2 | 1,041 | | |
| 8 | 1 | 78 | 77 | 77 | 77,3 | 0,577 | 76,2 | 1,093 |
| | 2 | 76 | 76 | 76 | 76 | 0 | | |
| | 3 | 76 | 74 | 76 | 75,3 | 1,155 | | |
| 9 | 1 | 85 | 84,5 | 82 | 83,8 | 1,607 | 84,4 | 1,112 |
| | 2 | 83,5 | 85 | 84,5 | 84,3 | 0,764 | | |
| | 3 | 85,5 | 85,5 | 84 | 85 | 0,866 | | |
| 10 | 1 | 66 | 65 | 65,5 | 65,5 | 0,5 | 65,3 | 0,829 |
| | 2 | 64 | 66 | 66 | 65,3 | 1,155 | | |
| | 3 | 64 | 65,5 | 66 | 65,2 | 1,041 | | |
| 11 | 1 | 73 | 74 | 73,5 | 73,5 | 0,5 | 73,4 | 0,858 |
| | 2 | 73 | 75 | 72 | 73,3 | 1,528 | | |
| | 3 | 74 | 73 | 73 | 73,3 | 0,577 | | |
| 12 | 1 | 89,5 | 88 | 87,5 | 88,3 | 1,041 | 88,5 | 1,146 |
| | 2 | 87 | 90 | 87 | 88 | 1,732 | | |
| | 3 | 89 | 89 | 89,5 | 89,2 | 0,289 | | |

Tablica 8.7. Rezultati ispitivanja tvrdoće – nastavak

| Stanje pokusa | Ispitno tijelo | Tvrdoća | | | \bar{x} | S | $\bar{\bar{x}}$ | \bar{S} |
|---------------|----------------|---------|------|------|-----------|-------|-----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | | |
| 13 | 1 | 75,5 | 72 | 73 | 73,5 | 1,803 | 74,1 | 1,387 |
| | 2 | 75 | 73 | 75 | 74,3 | 1,155 | | |
| | 3 | 74,5 | 73 | 76 | 74,5 | 1,5 | | |
| 14 | 1 | 83 | 81 | 82 | 82 | 1 | 81,6 | 1,341 |
| | 2 | 82,5 | 80 | 82,5 | 81,7 | 1,443 | | |
| | 3 | 82 | 82,5 | 79 | 81,2 | 1,893 | | |
| 15 | 1 | 79 | 79 | 79,5 | 79,2 | 0,289 | 78,6 | 0,741 |
| | 2 | 79,5 | 79 | 78 | 78,8 | 0,764 | | |
| | 3 | 77,5 | 78 | 78 | 77,8 | 0,289 | | |
| 16 | 1 | 91 | 90 | 91 | 90,7 | 0,577 | 90,8 | 0,618 |
| | 2 | 90 | 90,5 | 91 | 90,5 | 0,5 | | |
| | 3 | 91 | 92 | 90,5 | 91,2 | 0,764 | | |
| 17 | 1 | 81 | 81,5 | 80 | 80,8 | 0,764 | 81,1 | 0,993 |
| | 2 | 81 | 81 | 79,5 | 80,5 | 0,866 | | |
| | 3 | 81,5 | 83 | 81,5 | 82 | 0,866 | | |
| 18 | 1 | 80,5 | 80 | 78 | 79,5 | 1,323 | 79,0 | 1,173 |
| | 2 | 78,5 | 79 | 80 | 79,2 | 0,764 | | |
| | 3 | 77,5 | 77,5 | 80 | 78,3 | 1,443 | | |
| 19 | 1 | 77 | 76,5 | 76 | 76,5 | 0,5 | 75,9 | 0,768 |
| | 2 | 76,5 | 76,5 | 75 | 76 | 0,866 | | |
| | 3 | 75 | 76 | 75 | 75,3 | 0,577 | | |
| 20 | 1 | 80 | 78 | 80 | 79,3 | 1,155 | 79,3 | 1 |
| | 2 | 78,5 | 80,5 | 79,5 | 79,5 | 1 | | |
| | 3 | 80,5 | 78 | 79 | 79,2 | 1,258 | | |